N°499 - MAI 2015 - 6,40 €

LA Recherche

L'actualité des sciences

KILO
AMPÈRE
KELVIN
MOLE

Pourquoi les physiciens redéfinissent les unités de mesure

Premiers succès chez l'homme

SOIGNER LE CANCER AVEC DES VIRUS

MENSUEL DOM 7,40 € - BEL 7,40 € - LUX 7,40 € - D 8,20 € - ESP 7,40 € - GR 7,40 € - ITA 7,40 € - PORT.CONT 7,40 € - CAN 10,5 $ CAN - CH 12,40 FS - MAR 63 DH - TUN 6,500 - IND - MAYOTTE 8,80 € - TOM SURFACE 970 XPF - TOM AVION 1620 XPF - ISSN 00295671

M 01108 - 499 - F: 6,40 € - RD

Vous avez un projet de thèse ?
L'ADEME vous accompagne.

Étudiants, laboratoires, entreprises ou collectivités territoriales, contribuez par vos recherches, votre soutien technique ou vos financements à relever les défis d'aujourd'hui et demain dans les domaines de l'énergie et de l'environnement.

Étudiants, entreprises, laboratoires, collectivités locales, collaborez avec l'ADEME

Au cœur des missions de l'agence en matière de recherche depuis 1992, ce programme a permis la formation par la recherche de plus 1500 étudiants avec 60 % des thèses portant sur des procédés technologiques, 25 % sur les sciences de l'environnement et de la vie et 15 % sur les sciences humaines et sociales entre 1998 et 2009.

Dans ce dispositif, l'ADEME est acteur au sein d'un partenariat de 3 ans complet et équilibré, alliant **laboratoires, entreprises et collectivités**. Autour de chaque doctorant, la complémentarité des acteurs permettra d'explorer de nouveaux champs de connaissances scientifiques et technologiques dans les domaines d'intervention de l'Agence en tenant compte des attentes sociétales.

Sélection sur appel à candidatures chaque année du 1er janvier au 31 mars.

Pour plus d'informations : **www.ademe.fr/theses**

ADEME

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

www.ademe.fr

Crédits photo : fotolia, shutterstock

Conception KOSSUTH Communication

La Recherche

Sophia Publications
74, avenue du Maine 75014 Paris
Tél. : 01 44 10 10 10
Fax : 01 44 10 54 30
e-mail rédaction : courrier@larecherche.fr

Pour joindre directement par téléphone un membre de la rédaction, composez le 01 44 10, suivi des quatre chiffres placés après son nom. Par mail, libellez l'adresse sur le modèle : prenom.nom@larecherche.fr (sans accents).

La Recherche est publiée par **Sophia Publications,** filiale de Sophia Communications.

Président directeur-général et directeur de la publication **Thierry Verret**

Directeur éditorial **Maurice Szafran**

Directeur délégué **Jean-Claude Rossignol**

Assistante de direction **Christie Mazataud (13 74)**

ABONNEMENTS

Tarif France : 1 an 12 nos, 67 €

Tarif international : nous contacter.

Tél. : 01 55 56 71 15
00 (33) 1 55 56 71 15

E-mail : abo.recherche@biwing.fr

Adresse : Service abonnements La Recherche, 4 rue de Mouchy 60438 Noailles Cedex

Suisse : Edigroup
Tél. : (0041) 22 860 84 01.

Belgique : Edigroup
Tél. : (0032) 70 233 304

Achat de revues et d'écrins
La Recherche – BP65 - 24, chemin latéral 45390 Puiseaux – 02 38 33 42 89

Rédactrice en chef **Sophie Coisne**

Rédactrice en chef technique **Catherine Caltaux (54 16)**

Assistante **Gabrielle Monrose (54 38)**

Chef des informations **Philippe Pajot (54 18)**

Chef de service **Marie-Laure Théodule (54 22)**

Chefs de rubrique **Hervé Cabibbo (54 21), Mathias Germain (54 24)**

Rédacteurs **Gautier Cariou (54 19), Vincent Glavieux (54 29), Bérénice Robert (54 25)**

Conception graphique et direction artistique **Vincent Sainte Fare Garnot (54 13)**

1re rédactrice graphiste **Michèle Bourgeois (54 15)**

Service photo **Anne Viratelle (54 14)**

Secrétaire de rédaction **Véronique Fuvel (54 28)**

Responsable fabrication **Christophe Perrusson (13 78)**

Activités numériques **Emmanuelle Gérardin (54 52)**

Ont collaboré à ce numéro **Antoine Cappelle**

Directrice des ressources humaines **Rime Louhaichi (12 93)**

Directeur administratif et financier **Émilie Cormier (54 58)**

Responsable communication **Élodie Dantard (54 55)**

Directrice des ventes et promotion **Evelyne Miont (13 80)**

Vente messageries VIP-diffusion **Frédéric Vinot numéro vert 0800 51 49 74**

Directrice commerciale et marketing **Virginie Marliac (54 49)**

Responsable du marketing direct **Linda Pain (54 51)**

Responsable gestion abonnements **Isabelle Parez (13 60)**

Responsable comptabilité **Sylvie Poirier (12 89)**

Diffusion librairies **DIF'POP'. Tél. : 01 43 62 08 07 Fax : 01 43 62 07 42**

Directrice commerciale publicité et développement **Caroline Nourry (13 96)**

Directeurs de clientèle **Antoine Faure (12 57)** **Eddie Barazzuol (12 12)** **Françoise Hullot (12 13)**

Imprimerie **G. Canale & C.**, Via Liguria 24, 10071 Borgaro (TO), Italie.

Dépôt légal à parution.

Les titres, les intertitres, les textes de présentation et les légendes sont établis par la rédaction du mensuel. La loi du 11 mars 1957 interdit les copies ou reproductions destinées à une utilisation collective. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur, ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite (article L.122-4 du Code de propriété intellectuelle). Toute copie doit avoir l'accord du Centre français du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris. Tél. : 01 44 07 47 70. Fax : 01 46 34 67 19). L'éditeur s'autorise à refuser toute insertion qui semblerait contraire aux intérêts moraux ou matériels de la publication.

Commission paritaire : 0919 K 85863. ISSN 0029-5671

Haute précision

PAR **Sophie Coisne**
rédactrice en chef

Combien pèse un kilo ? La question ressemble à une blague d'enfant. Elle tarabuste pourtant les physiciens depuis plusieurs années. Voire leur met la pression. Car la Conférence générale des poids et mesures l'a décidé en novembre dernier : le kilogramme doit être révisé en 2018, tout comme trois autres unités, le kelvin, l'ampère et la mole. Pour le moment, l'étalon de notre bon vieux kilo est un cylindre de platine façonné en 1889 et conservé sous trois cloches de verre et l'épaisseur d'un coffre-fort. Cela fleure bon la vieille France. Un brin en décalage avec la physique actuelle, peut-être. Combien pèse ce kilo ? Un kilo ? Aucun métrologiste n'y mettrait sa main à couper. Car lorsque les chercheurs comparent cet étalon à sa centaine de (vieilles) copies, un écart de masse de quelques dizaines de microgrammes apparaît. Et dire que « la calibration de tous les instruments du monde est faite par rapport à cet étalon ou ses copies », *comme nous l'explique le physicien Philippe Richard dans ce numéro (p. 62) ! Les physiciens sont à pied d'œuvre pour définir le kilogramme sous forme d'une équation fondée sur une constante physique, la constante de Planck. Reste à fixer sa valeur au plus juste. Pas vraiment un jeu d'enfant.*

La Recherche

Nº 499
Mai 2015

La Recherche
est publiée par
Sophia publications,
filiale de Sophia
Communications

En couverture :
© VLADIMIR GODNIK/
FSTOP/ PLAINPICTURE

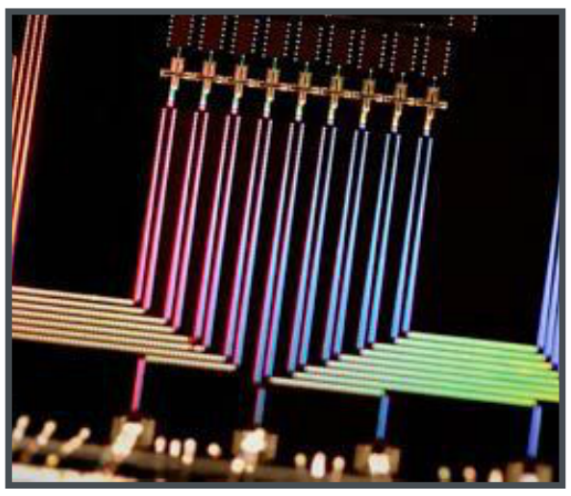
Offre d'abonnement : p. 61

Ce numéro comporte un encart jeté *La Recherche* sur les ventes France et export (hors Suisse et Belgique) ; un encart jeté Edigroup (sur les ventes kiosques Suisse et Belgique).

actualités

3 **Éditorial**

6 **Courrier**



8 **Événement**
Ordinateur quantique à l'horizon !

12 **Paléontologie**
Le genre *Homo* a vieilli de 400 000 ans
Cancérologie
Le chromosome X silencieux réactivé dans le cancer du sein

14 **Climatologie**
Le vêlage des glaciers mis sur écoute
Technologie
Record de vitesse pour une imprimante 3D
Neurosciences
Philippe Amouyel : « Les ultrasons réduisent les plaques amyloïdes associées à la maladie d'Alzheimer »

16 **Astronomie**
De l'eau cachée dans les satellites

18 **Santé**
Une « vaccination naturelle » contre les allergies alimentaires
Climat
La forêt amazonienne absorbe de moins en moins de CO_2
Physique La goutte d'eau : météorite de laboratoire

20 **Paléontologie** Neandertal, orfèvre bien avant *sapiens*
Physique
Einstein a encore raison
Web du mois
L'ONU au chevet du climat
Neurologie Des neurones implantés dans le cortex visuel

22 **Mathématiques** Deux Américains se partagent le prix Abel
Environnement
L'Amazonie fertilisée par le Sahara

24 **Astronomie**
Immense Voie lactée
Épigénétique
Comment agrandir les fourmis

25 **Politiques** Un nouveau souffle pour le Human Brain Project ?
Climat Les émissions de CO_2 stagnent en 2014

Retrouvez *La Recherche* le 6 mai à 16 heures, dans l'émission « Autour de la question »

www.larecherche.fr

POUR RECHERCHER
> Les archives du magazine : Trouvez les sujets qui vous intéressent dans une base de plus de 20 000 articles

POUR S'INFORMER
> L'actualité de la recherche, le blog des livres et l'agenda des manifestations scientifiques

POUR ACHETER
> Abonnement et vente d'anciens numéros
> Livres sélectionnés par *La Recherche*, outils du chercheur

La Recherche sur Twitter... Rejoignez-nous sur Twitter pour un éclairage original sur la science et les technologies **http://twitter.com/maglarecherche**

savoirs

26 **Dossier**

À la rencontre des premiers artistes de l'humanité

28 La découverte qui a réécrit l'histoire de l'art
par Carole Fritz et Gilles Tosello

32 Dans l'atelier de la caverne du Pont d'Arc par Carole Fritz et Gilles Tosello

42 **Cancérologie**
Des virus tueurs de tumeur
par Mathias Germain

48 **Astronomie**
Tchouri, une comète pleine de vide ?
par Julien Bourdet

54 **Environnement**
François Galgani : « Trop de plastiques dans les océans »
propos recueillis par Marie-Laure Théodule

57 Des déchets, des bactéries et des bioplastiques
par Stéphane Bruzaud

62 **Physique**
Unités de mesure cherchent étalon
par Vincent Glavieux

68 **Portrait Pierre Védrine**
« Le prix Nobel de physique 2013, c'est un peu le mien » par Viviane Thivent

idées

78 **L'entretien du mois**
avec Dominique Gombert
« Le bisphénol A suscite encore des controverses »
propos recueillis par Alain Perez

82 **Déchiffrage**
1300 mosquées et 50000 églises en France
par Hervé Le Bras

86 **Histoire de science**
Des coquillages qui sèment la discorde
par Marie-Christine de La Souchère

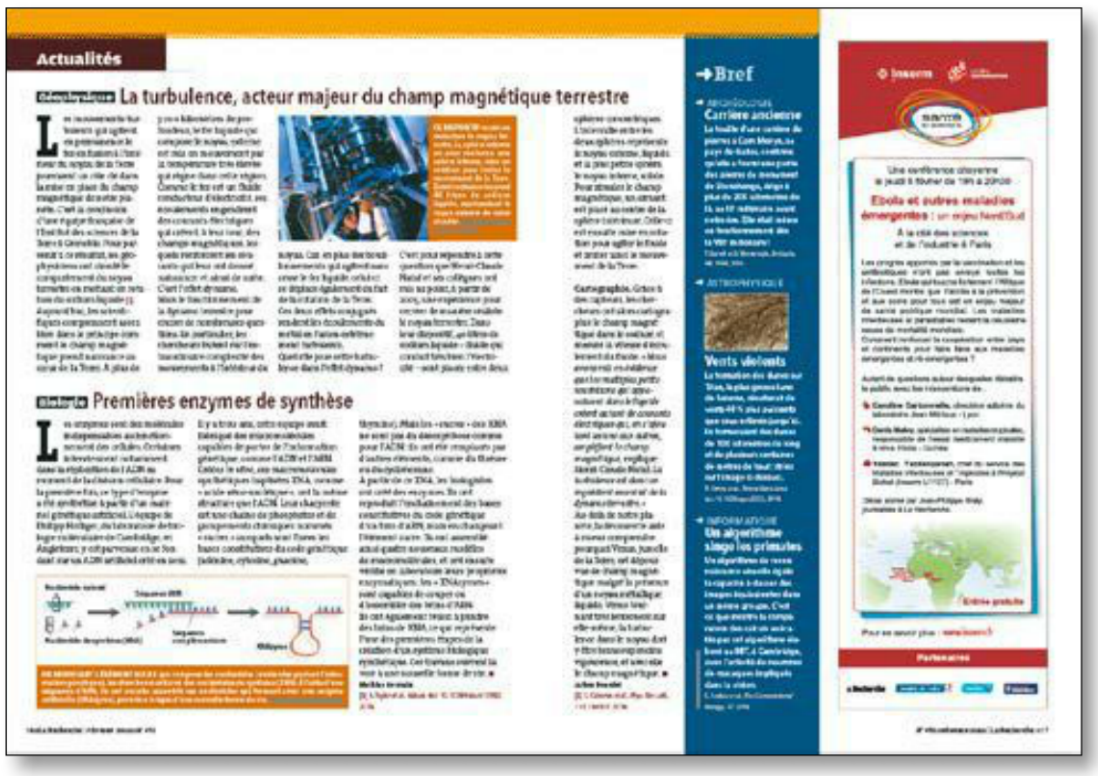
91 **Les livres**

96 **L'agenda**

98 **Curiosités**

Dossier spécial p. 83
La Cosmétique relève le défi de l'innovation
En partenariat avec Cosmetic Valley France

Expérience et simulation


Actualités

La turbulence, acteur majeur du champ magnétique terrestre

Premières enzymes de synthèse

Bref

Carrière ancienne

Vents violents

Un algorithme singe les primates

Ebola et autres maladies émergentes : un enjeu Nord/Sud

Des chercheurs grenoblois ont reproduit les turbulences du noyau terrestre par un dispositif expérimental (*La Recherche* n°496, p. 16). En géologie, lorsque l'objet d'étude n'est pas directement accessible, les chercheurs ont souvent recours à la simulation numérique. Ces deux approches sont-elles complémentaires, ou la simulation est-elle utilisée par défaut lorsqu'une expérience n'est pas possible à mettre en place ? Les chercheurs de l'Institut des sciences de la Terre ont-ils utilisé ou envisagé la simulation pour étudier ce même phénomène ?

Courriel de Morgane Pelletier

Réponse de Henri-Claude Nataf

Vous avez raison : les simulations numériques sont incontournables et elles jouent un rôle essentiel dans notre compréhension de la dynamique du noyau terrestre. Cependant elles sont mises en échec par la très grande gamme d'échelles spatiales et temporelles qui caractérise la turbulence. Les expériences de laboratoire telles celles que nous réalisons à ISTerre apportent un éclairage complémentaire irremplaçable sur l'organisation et le rôle de la turbulence dans les conditions du noyau. De plus en plus, nous comparons et couplons ces deux approches. C'est ce que nous avons fait pour les travaux présentés dans cet article, et la bonne convergence que nous avons observée renforce notre conviction d'être sur la bonne voie.

Milieu toxique

L'article « L'oxygénation de l'atmosphère ralentie par le fer » (*La Recherche* n°497, p. 20) prête à confusion. Il serait aberrant de considérer qu'un organisme qui se développe dans un milieu donné, avec le métabolisme autorisé par ces conditions, est confronté à la « toxicité » de son milieu. Confronter des cyanobactéries actuelles avec un milieu enrichi en fer et constater le ralentissement de leur métabolisme est un indice que la concentration en fer n'autorise pas un niveau élevé de métabolisme. Parler de « molécules de stress identifiées, indices de leur mauvaise santé » appuie l'idée qu'à l'époque, le faible métabolisme était aussi lié à une mauvaise santé due au milieu, plutôt qu'un niveau de métabolisme atteint dans leur évolution dans cet environnement. À moins que le milieu ait changé par enrichissement en fer. Mais ça, ce n'est pas clairement exprimé dans l'article. En bref, on laisse supposer que les cyanobactéries initiales sont les mêmes que celles que l'on trouve actuellement, qu'elles n'ont pas évolué !

Courriel de Frank Vancayemberg

Réponse d'Elizabeth Swanner

La sédimentologie nous dit que les conditions géochimiques dans lesquelles vivaient les cyanobactéries n'étaient pas statiques. Les défenses moléculaires n'étaient probablement pas présentes chez les cyanobactéries lorsqu'elles rencontraient pour la première fois les produits qui leur sont toxiques. Mais les cyanobactéries que nous avons utilisées possèdent de telles défenses, et continuent de ressentir la toxicité du fer. Notre interprétation concernant le stress ressenti par leurs ancêtres moins bien équipés est donc plutôt prudente.

Résultats négatifs

Si les publications scientifiques ne montrant pas de résultats significatifs sont malgré tout intéressantes et utiles, quel traitement peut-on leur réserver ? L'exemple des avantages du bilinguisme indique que les revues s'en désintéressent (*La Recherche* n°496, p. 15), alors existe-t-il d'autres moyens de prendre en compte leurs résultats ?

Courriel de Jean-Marc Loriol

Réponse d'Anne Christophe

Idéalement, il faudrait faire en sorte que les études à résultats négatifs soient rendues publiques au même titre que les autres. Il y a toute une réflexion à ce sujet : certains préconisent de créer des journaux scientifiques spécialisés dans les résultats négatifs (il en existe quelques-uns), d'autres d'inciter les chercheurs et les revues à faciliter la publication de résultats négatifs. On peut aussi créer des lieux où l'on puisse déposer ses résultats, qu'ils soient négatifs ou positifs, pour la réalisation de méta-analyses (des analyses de l'ensemble des études sur une question de recherche, comme celle réalisée sur les avantages cognitifs du bilinguisme) ou répliquer les mêmes études à travers différents laboratoires (pour éviter les faux positifs). La méta-analyse critique publiée dans la revue *Psychological Science* montre que nous allons dans la bonne direction.

Barrière spatiale

L'article sur la barrière protégeant la Terre des électrons de haute énergie (*La Recherche* n°496, p. 13) donne peu de détails sur la nature possible des particules à l'origine du champ magnétique. Ces « particules chargées d'énergie moindre » pourraient-elles provenir également du vent solaire, ou les astronomes ont-ils d'autres hypothèses ?

Courriel de Patrick Delhommais

Réponse de Philippe Zarka

Le champ magnétique terrestre provient de courants circulant à l'intérieur de la Terre, et celui du vent solaire du champ magnétique solaire dû à des courants circulant dans l'intérieur solaire. Les particules chargées du vent solaire et de l'espace circumterrestre ne sont donc pas « à l'origine du champ magnétique ». Les particules chargées qui peuplent la magnétosphère terrestre et produisent ou interagissent avec des ondes proviennent du vent solaire et de l'ionosphère terrestre.

Erratum

Dans l'article « L'oxygénation de l'atmosphère ralentie par le fer » (*La Recherche* n°497, p. 20), les cyanobactéries ne sont pas des plantes marines unicellulaires mais des bactéries capables de faire de la photosynthèse.

Sauf mention contraire de leur auteur, toute lettre parvenue à la rédaction de *La Recherche* est susceptible d'être éditée et publiée, en tout ou en partie, dans le journal. Les lettres concernant un auteur extérieur à la rédaction de *La Recherche* lui sont envoyées. Sans réaction de l'auteur dans un délai raisonnable, nous les considérons comme publiables en tout ou en partie, sans attendre une éventuelle réponse de sa part. Dans la mesure du possible, évitez les fax et les lettres manuscrites.

ÉLUCIDER

Identification des victimes, causes et circonstances du décès, l'anthropologie médico-légale est l'application de l'anthropologie aux enquêtes criminelles.

Ce livre s'adresse aux médecins légistes, aux anthropologues, aux odontologistes, aux radiologues et aux biologistes.

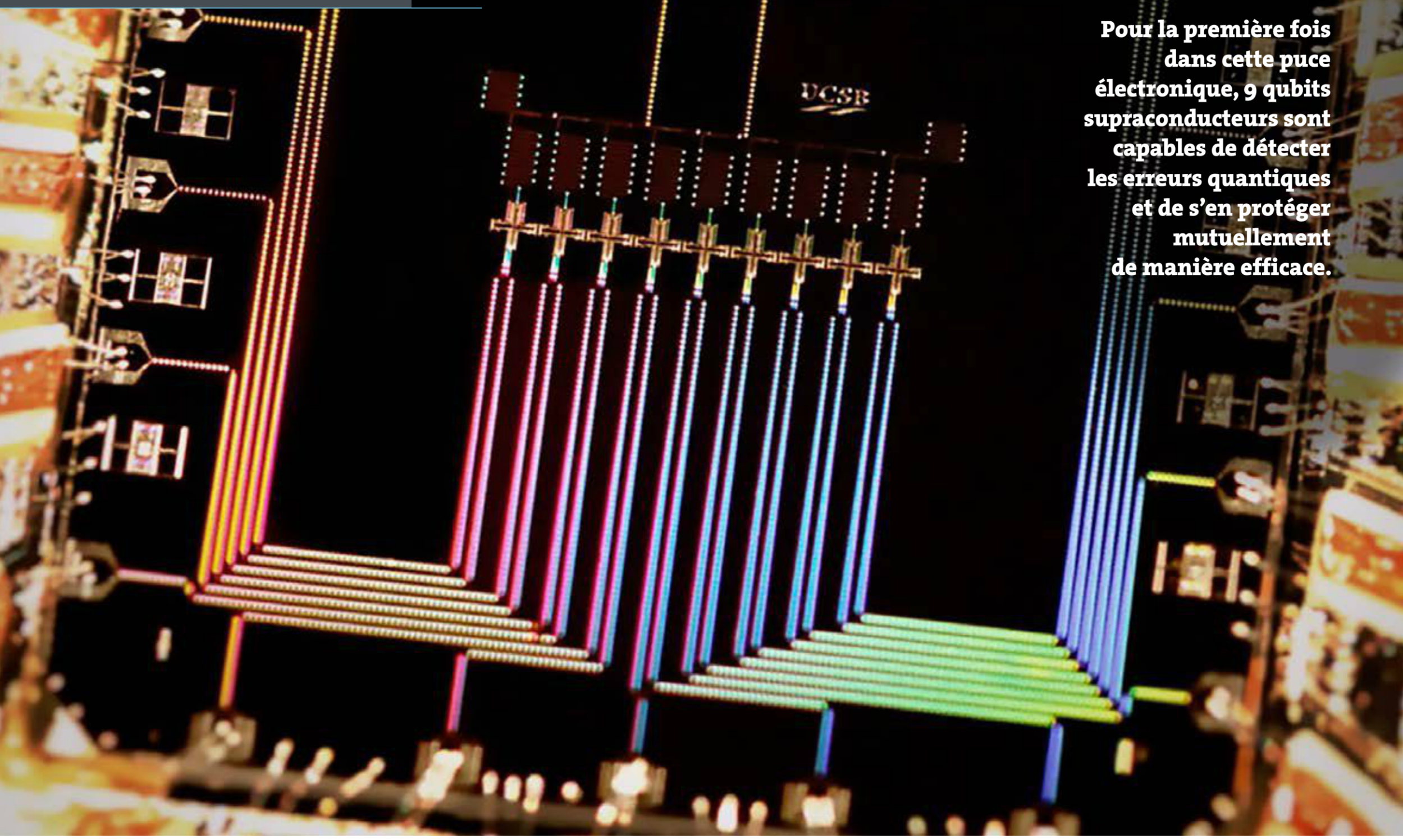
Les magistrats, policiers et gendarmes, notamment les techniciens de l'identité judiciaire ou de l'identification criminelle, pourront y trouver des réponses pratiques aux problèmes rencontrés sur le terrain.

- Le traité d'anthropologie médico-légale **le plus complet** et le plus récent en langue française
- Plus de **900 photographies** et illustrations en couleurs
- Plus de **1200 tableaux** synthétiques

Édition 2015 • 1880 pages • 120€
ISBN : 9782804184698

En librairie et sur www.deboecksuperieur.com

de boeck supérieur



Pour la première fois dans cette puce électronique, 9 qubits supraconducteurs sont capables de détecter les erreurs quantiques et de s'en protéger mutuellement de manière efficace.

Ordinateur quantique à l'

Des physiciens ont avancé dans la mise au point d'un qubit, l'unité de calcul de base d'un ordinateur quantique. Ils ont ainsi fabriqué un système capable de protéger un qubit de l'une des principales sources d'erreurs.

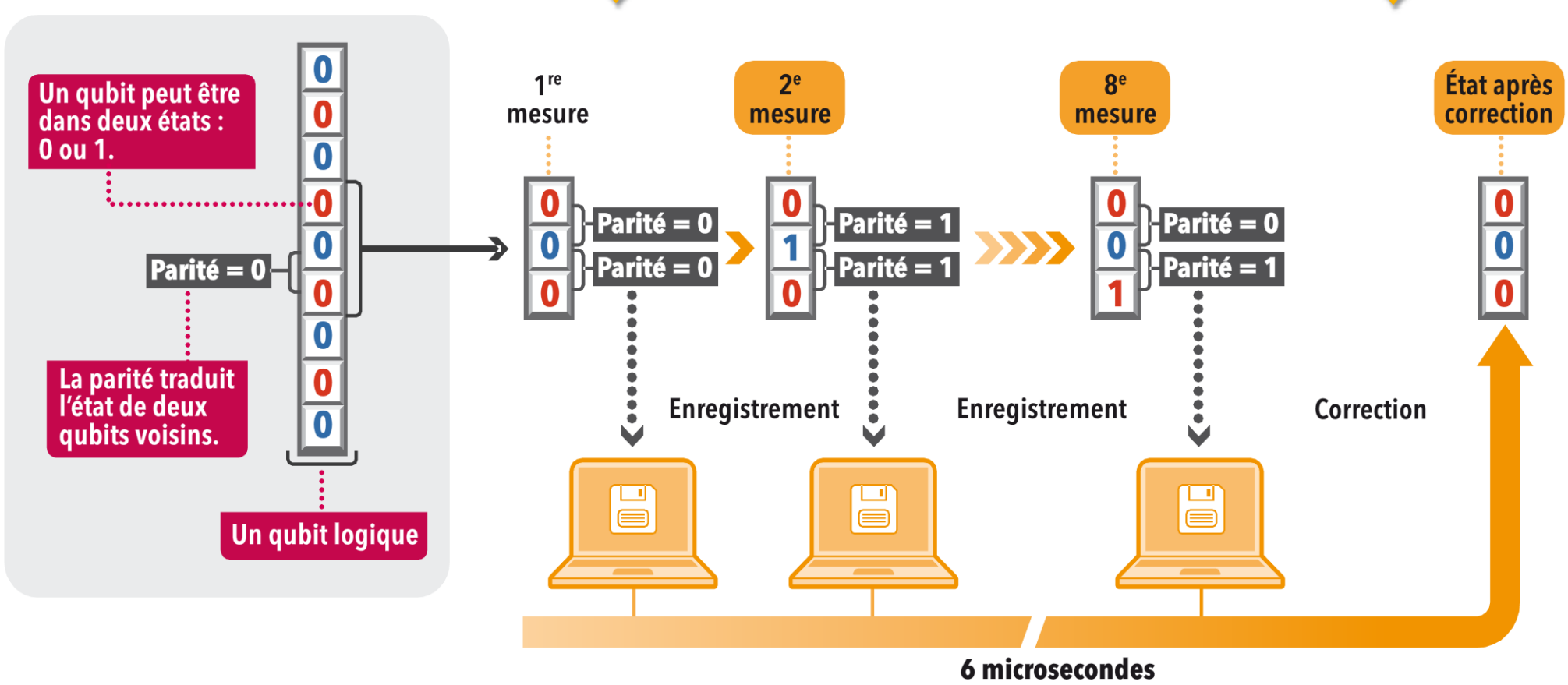
PAR **Gautier Cariou,**
journaliste.

La puissance des ordinateurs est colossale ? Vous n'avez encore rien vu. Dans quelques années, pour les plus optimistes, des ordinateurs quantiques verront le jour. Dotés d'un processeur de 300 bits quantiques – ou qubits –, ils permettront par exemple de manipuler simultanément 2^{300} données, soit autant de données que l'humanité a générées depuis sa naissance. Cette faculté peut être obtenue en exploitant les propriétés quantiques de la matière. À condition de conserver suffisamment longtemps ces propriétés pour permettre à la machine de réaliser des calculs quantiques. Un beau succès vient d'être obtenu dans ce sens par une équipe de l'université de Californie, aux États-Unis : elle a créé un système capable de détecter et de corriger les erreurs susceptibles d'entraver le calcul quantique [1].

Superposition et intrication. Un qubit est l'analogue quantique du bit, information élémentaire d'un ordinateur classique. Le bit ne peut prendre que deux valeurs, 0 ou 1, selon que le courant électrique passe ou non à travers un transistor. Le qubit, en revanche, est un système physique (atome, ion, photon, circuit supraconducteur) soumis aux lois de la mécanique quantique. Par conséquent, il peut être dans l'état 0 ou dans l'état 1, mais aussi dans une « superposition » de ces deux états. Autrement dit, il peut exister simultanément dans l'état 0 et dans l'état 1. De plus, lorsque deux qubits interagissent entre eux, leurs états physiques « s'enchevêtrent », si bien que les deux systèmes ne peuvent plus être décrits de façon indépendante : on parle d'un « état intriqué ». Grâce à

© JULIAN KELLY/ UNIVERSITY OF CALIFORNIA, SANTA BARBARA

Fig.1 Comment est détectée l'erreur quantique



LA DÉTECTION DE L'ERREUR QUANTIQUE s'effectue en contrôlant le changement d'état de deux qubits voisins au cours du temps. Pour ce faire, leur parité est mesurée, et leur valeur est enregistrée par un ordinateur, huit fois de suite pendant six microsecondes : si la valeur de la parité change, alors une erreur s'est produite. Un logiciel décompte ensuite ces erreurs puis les corrige numériquement.

© INFOGRAPHIE BRUNO BOURGEOIS

horizon !

ces deux phénomènes quantiques que sont la superposition et l'intrication, un ordinateur quantique peut en théorie avoir accès à la totalité des résultats possibles d'un calcul en une seule étape quand un ordinateur classique doit traiter l'information de façon séquentielle, un résultat après l'autre.

Qubit logique. La première étape vers la fabrication d'un ordinateur quantique consiste à créer un « qubit logique », c'est-à-dire un qubit qui conserve ses propriétés quantiques suffisamment longtemps pour réaliser des calculs. « *Toutefois, malgré des années de recherche, personne n'est encore parvenu à en créer un,* explique Benjamin Huard, physicien au laboratoire de physique Pierre-Aigrain, de l'École normale supérieure de Paris. *La cause de cet échec est la décohérence, un phénomène qui se manifeste lorsqu'un système quantique interagit avec son environnement (lumière, champ magnétique, etc.). Le système perd alors très rapidement ses propriétés quantiques. Dans le cas d'un qubit, l'état d'origine, par exemple une superposition de 0 et de 1, évolue vers les états classiques 0 ou 1.* »

Dans un article publié en 1995 [2], le mathématicien américain Peter Shor a démontré qu'il est en théorie possible de corriger la totalité des erreurs liées à la décohérence, à condition de supprimer deux sources principales d'erreurs : « l'inversion de phase » et « l'inversion de bit ». Cette dernière se traduit par le passage inopiné de l'état 0 à l'état 1. C'est à ce type d'erreur que s'est attaqué John Martinis, physicien à l'université de Californie, qui a rejoint Google en 2014. Pour la première fois, son équipe est parvenue à stabiliser l'état de 9 qubits, grâce à un système capable de détecter puis de corriger efficacement l'erreur quantique liée à l'inversion de bit.

Information protégée. Leur dispositif consiste en 9 circuits supraconducteurs en aluminium d'environ 100 micromètres de large chacun, alignés les uns à côté des autres sur une surface en saphir. Refroidis à une température de quelques dizaines de millikelvins, ces 9 qubits se comportent >>>

L'essentiel

> POUR QU'UNE MACHINE réalise des calculs quantiques, il faut conserver suffisamment longtemps les propriétés quantiques de la matière.

> LES SYSTÈMES QUANTIQUES sont sujets à la « décohérence » qui leur fait perdre leurs propriétés quantiques.

> DES PHYSICIENS viennent de présenter un système capable de réduire drastiquement le taux d'erreurs lié à l'inversion de bits, l'une des principales manifestations de la décohérence.

Ordinateur quantique à l'horizon !

>>> de manière quantique. Chaque qubit peut ainsi s'intriquer avec son voisin direct, si bien que leur état quantique est corrélé. « *Ce groupe de 9 "qubits physiques" corrélés représente collectivement un "qubit logique", celui qui contient l'information utile pour le calcul quantique et qui doit être protégé de la décohérence. Et cela même s'ils sont séparés spatialement.* » Seul l'état global de ce groupe de contrôle est pris en compte dans le calcul. L'alliance de quelques qubits protège ainsi l'information.

Parité des qubits. En informatique classique, cette protection consisterait à encoder l'information d'un bit logique sur plusieurs bits physiques au lieu d'un seul. Par exemple, trois bits physiques 1-1-1 correspondraient au bit logique 1 et les trois bits 0-0-0 au bit logique 0. « *Ainsi, si une erreur survient pendant le calcul, par exemple 1-1-1 devient 1-0-1, alors on sait que l'erreur provient de l'inversion du bit du milieu. Il suffit ensuite de "retourner" ce bit virtuellement, à l'aide d'un programme informatique, pour corriger l'erreur.* »

Le système de protection d'erreur utilisé par John Martinis et son équipe agit de façon analogue, mais avec 9 qubits. En pratique, la détection de l'erreur quantique se fait en vérifiant que deux qubits voisins restent bien dans le même état quantique au cours du temps. Pour cela, les chercheurs mesurent leur parité, une propriété qui traduit les états quantiques d'une paire de qubits. Si la valeur de la parité ne change pas au cours du temps, alors les deux qubits sont restés dans le même état. Autrement dit, aucune erreur de type inversion de bit ne s'est produite.

Avant la mesure, les qubits physiques sont tous placés dans le même état quantique, l'état 0 [Fig.1]. Chaque qubit physique forme une paire avec son voisin. La parité n'est évaluée que sur un des deux qubits : le « qubit-mesure ». Le deuxième qubit, dit « qubit-donnée », n'est pas mesuré directement, ce qui permet de conserver l'information qu'il contient. Si deux qubits voisins restent dans le même état quantique, la parité vaut 0. Elle vaut 1 si l'un des deux qubits a subi une inversion de bit pendant un cycle. Pendant une période de six microsecondes, « *on réalise huit fois la même mesure de parité pour chaque paire de qubits. De cette façon, on peut savoir précisément dans quel cycle un changement aléatoire dû à la décohérence est survenu,* détaille Benjamin Huard. *À la fin de ces huit cycles, un logiciel décompte les erreurs, c'est-à-dire les changements de parité, et corrige l'information numériquement en conséquence* ».

Code de surface. Le système de correction quantique mis au point par l'équipe de John Martinis est le premier pas vers une architecture plus sophistiquée et robuste baptisée « code de surface ». Cette dernière a été imaginée en 1997 par Alexei Kitaev, aujourd'hui physicien à l'Institut de technologie de Californie [3]. Elle consiste en un grand échiquier où alterneraient un qubit-donnée et un qubit-mesure. Selon Benjamin Huard, « *une telle architecture, si elle voyait le jour, permettrait de s'affranchir à la fois des erreurs liées à l'inversion de bit et de celles provoquées par l'inversion de la phase. Et donc de corriger toutes les erreurs quantiques possibles* ». John Martinis et son équipe concrétisent une ligne de cet échiquier. Par conséquent, ce système ne parvient à corriger qu'une seule source d'erreur : l'inversion de bit. Quand on parviendra à fabriquer un échiquier d'une centaine de ces qubits, une telle surface permettra d'encoder plusieurs qubits logiques et de les protéger suffisamment longtemps pour exécuter de véritables calculs quantiques.

Principal obstacle à la fabrication d'un tel processeur quantique : l'encombrement des qubits. « *Construire un tel réseau représente un défi d'ingénierie, car il faut fabriquer des qubits qui ne se chevauchent pas,* explique Benjamin Huard. *Mais des entreprises comme Google et IBM s'y attèlent et investissent beaucoup dans leur fabrication. On peut même imaginer une phase d'industrialisation assez rapide dans une dizaine d'années. Je fais partie des optimistes : on n'est pas si loin d'un ordinateur quantique.* » ■

[1] J. Kelly *et al., Nature, 519,* 66, 2015.
[2] P. Shor, *Physical Review A, 52,* 2493, 1995.
[3] A. Fowler *et al., Physical Review A, 86,* 032324, 2012.

IBM et Google préparent leur processeur quantique

Pourquoi le « code de surface », cette architecture de processeur qui garantirait une conservation des propriétés quantiques de la matière et permettrait ainsi de réaliser des calculs quantiques, est-il si difficile à fabriquer ?
Cette puce électronique doit être dotée de plus d'une centaine de circuits supraconducteurs – les qubits – organisés en un réseau à deux dimensions. Chaque qubit dispose d'un résonateur, un circuit encombrant en forme de serpentin de quelques centaines de micromètres de long. Or, pour en placer plusieurs sur une surface à deux dimensions, il faut éviter que les résonateurs ne se gênent ou ne se touchent. Ce qui n'a pas encore été obtenu dans les laboratoires académiques. IBM, Google et Raytheon se sont emparés du problème. Ils développent chacun de leur côté des architectures originales de réseaux de qubits et réfléchissent à des procédés de fabrication industriels. Les chercheurs d'IBM élaborent par exemple des qubits en trois dimensions, sortes de blocs 3D, qu'ils veulent mettre en série pour créer des réseaux de qubits fonctionnels. Pour l'heure, il ne s'agit que de prototypes. Aucune date d'industrialisation ou de commercialisation n'a été annoncée.

— EXPOSITION —

PROPOSÉE PAR TARA EXPÉDITIONS

L'OCÉAN QUI ME PROTÈGE

NOTRE PLANÈTE OCÉAN

L'OCÉAN QUE JE RESPIRE

28 MAI 2015

COUR D'HONNEUR - CNAM

Le Monde LA Recherche PRÉSENTENT FORUM
SCIENCE, RECHERCHE & SOCIÉTÉ
7e édition

www.forum-srs.com

tara EXPEDITIONS
www.taraexpeditions.org

agnès b. · Serge Ferrari · BILLERUDKORSNÄS · IDEC GROUPE · LORIENT AGGLOMERATION · Fondation VEOLIA · UNESCO United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization · Intergovernmental Oceanographic Commission

© Design by LaNiak.com

Paléontologie

Le genre *Homo* a vieilli de 400 000

Une mâchoire d'hominidé vieille de 2,8 millions d'années a été découverte en Éthiopie. Elle repousse de 400 000 ans l'âge du genre *Homo*.

« *C'est le plus ancien fossile attribué au genre humain* », se réjouit Brian Villmoare, paléontologue à l'université du Nevada, aux États-Unis [1]. Il s'agit d'un morceau de mandibule gauche de 7 centimètres de long, possédant 6 dents. Daté d'il y a 2,8 millions d'années, il a été exhumé en Éthiopie, sur le site de Ledi-Geraru. Jusqu'à présent, le plus ancien fossile attribué à un représentant du genre *Homo* était vieux de 2,4 millions d'années. La mâchoire repousse donc de 400 000 ans la genèse de ce groupe, dont nous faisons partie.

CETTE MANDIBULE GAUCHE (partie inférieure de la mâchoire) présente une rangée de 6 dents qui permettent de l'identifier comme appartenant à un ancien *Homo*. Mais ses dimensions sont celles d'une mâchoire d'australopithèque. © BRIAN VILLMOARE/ ARIZONA STATE UNIVERSITY

Plusieurs caractères anatomiques, dits « dérivés », relient cette mandibule au genre *Homo* : la première prémolaire a une forme symétrique, les molaires sont allongées et étroites. La mandibule a une hauteur constante. Mais elle possède aussi des traits « primitifs » propres aux australopithèques, à qui appartenait Lucy. Sa partie antérieure est fuyante et ses dimensions sont plus proches de celle d'une mâchoire d'australopithèque que d'*Homo*.

Selon Brian Villmoare, cette combinaison de caractères anciens et récents est le signe « *d'une morphologie de transition entre* Australopithecus *et* Homo. » Antoine Balzeau, du Muséum national d'histoire naturelle, invite toutefois à la prudence. « *Dans l'absolu, c'est une découverte magnifique parce qu'elle fait vraiment remonter le genre* Homo *dans le temps. Mais ces questions de filiation sont insolubles.* » La difficulté majeure tient dans la rareté des fossiles et à leur état fragmentaire. De plus, la variété des espèces mises au jour a conduit la majorité des paléontologues à remettre en question la théorie gradualiste, selon laquelle l'évolution serait un chemin linéaire menant jusqu'à nous. Sandrine Prat, paléontologue au pôle Dynamique de l'évolution humaine au CNRS, à Paris, confirme : « *Aujourd'hui, on pense plutôt qu'il y a un buissonnement d'espèces d'hominidés avec plusieurs rameaux.* » Comment dès lors replacer cette mâchoire dans l'histoire de l'évolution humaine ? « *Qu'une pièce présente des mélanges de caractères est classique en paléontologie, aussi faut-il être prudent dans l'attribution générique du spécimen,* explique Brigitte Senut, paléontologue au

© ERIN DIMAGGIO

C'EST EN ÉTHIOPIE, dans la dépression de l'Afar, qu'a été mise au jour la mâchoire d'hominidé. Située à la jonction de trois plaques tectoniques, cette dépression abrite également le fossile de l'australopithèque Lucy.

ans

Muséum national d'histoire naturelle. *Si c'est réellement un* Homo, *cela ne me surprend pas car je fais partie de ceux qui considèrent que les premiers d'entre eux ont très bien pu apparaître il y a près de 4 millions d'années.* » Plus qu'elle n'apporte de réponse tranchée, la mandibule témoigne donc surtout de l'ancienneté et la diversité des espèces humaines.

Changement climatique. Une équipe de l'université d'Arizona, aux États-Unis, a tenté de savoir dans quel environnement vivait le propriétaire de la mâchoire découverte [2]. Elle a étudié les fossiles d'animaux présents dans la région entre 3 et 2,5 millions d'années : il s'agissait d'éléphants, d'antilopes et d'autres espèces typiques des grands espaces. À l'inverse, avant 3 millions d'années, ce territoire était plutôt couvert d'arbres.
Un changement climatique aurait pu ainsi transformer les forêts en plaines. Ces données nouvelles confirment la théorie de l'« *Homo* Event », que le paléontologue français Yves Coppens a formulée dès les années 1970. Selon ce modèle, un changement climatique aurait favorisé l'apparition des premières espèces du genre *Homo*, en forçant les hominidés à s'adapter à leur nouvel environnement. ■ **Thibault Panis**

[1] B. Villmoare *et al.*, *Science, 347,* 1352, 2015.
[2] E.N. DiMaggio *et al.*, *Science, 347,* 1355, 2015.

→ Bref

→ ASTRONOMIE

Première collision d'étoiles

En 1670, des astronomes ont rapporté l'apparition d'une étoile dans la constellation du Cygne. En analysant les gaz avoisinants, une équipe internationale a conclu que cette nova résultait de la collision de deux étoiles.

T. Kaminski *et al.*, *Nature,* doi:10.1038/nature14257, 2015.

→ TECHNOLOGIE

Camouflage de silicium

Des chercheurs de l'université de Californie à Berkeley, aux États-Unis, ont mis au point un film en silicium extrafin (180 nanomètres) de 1 centimètre carré qui change de couleur lorsqu'on l'étire. Une piste pour créer des revêtements thermiques ou de camouflage.

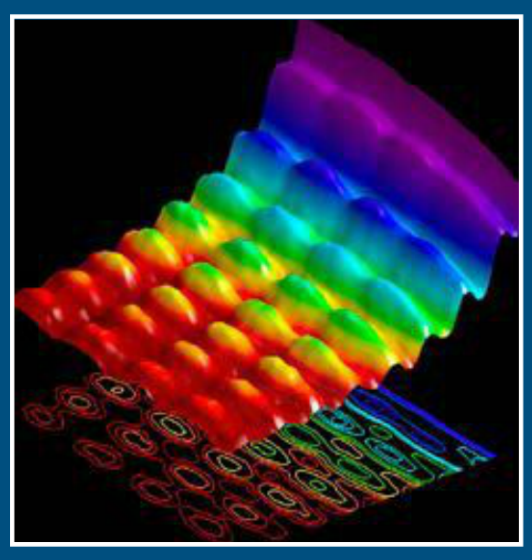
L. Zhu *et al.*, *Optica, 2,* 255, 2015.

→ PHYSIQUE

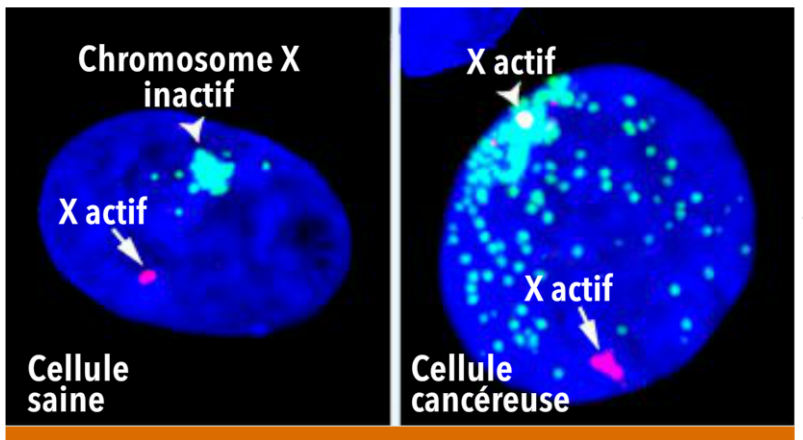
La lumière dans tous ses états

Des physiciens suisses ont réalisé la première photo où la lumière apparaît simultanément sous forme d'onde et de flux de particules. Ils ont envoyé des électrons vers un nanofil baigné de lumière laser. Puis ils ont photographié l'onde lumineuse et détecté l'interaction des électrons avec des photons de cette même onde.

L. Piazza *et al.*, *Nat. Commun.*, doi : 10.1038/ncomms7407, 2015.



© FABRIZIO CARBONE/ EPFL 2015



© RONAN CHALIGNÉ/ INSTITUT CURIE

DANS LE NOYAU d'une cellule cancéreuse, le chromosome X habituellement inactif devient actif car il y est moins condensé.

Cancérologie

Le chromosome X silencieux réactivé dans le cancer du sein

Chez les femmes, les cellules de l'organisme comprennent deux chromosomes X dans leur noyau. Dans chaque cellule, l'un d'eux est inactivé afin qu'il n'y ait pas de surproduction de protéines codées par ce chromosome. Mais dans une cellule cancéreuse, cette mise en silence du second chromosome peut devenir instable. C'est ce que révèle une équipe de l'institut Curie, à Paris [1].
Les biologistes ont travaillé en laboratoire sur trois lignées différentes de cellules cancéreuses du sein et sur des tumeurs mammaires au stade précoce. Ils ont observé l'organisation du chromosome X inactif à l'aide de techniques d'imagerie par fluorescence. Dans le noyau d'une cellule, l'ADN d'un chromosome se présente sous la forme d'un enroulement plus ou moins condensé des brins d'ADN autour de plusieurs protéines, la chromatine. Pour un chromosome X inactif chez une cellule saine, la chromatine est très condensée, camouflant l'ADN et empêchant sa transcription. Elle apparaît comme un amas compact plaqué contre la membrane du noyau. Toutefois, dans les différentes cellules cancéreuses observées, les chercheurs ont trouvé de la chromatine beaucoup plus diffuse. Ce changement expose des brins d'ADN, susceptibles alors d'être transcrits et de produire des protéines de façon désordonnée. Cette désorganisation de la cellule peut conduire à une multiplication anormale. Au niveau clinique, ces travaux devraient aider à mettre rapidement en évidence les anomalies du chromosome X inactif. ■ **Mathias Germain**

[1] R. Chaligné *et al.*, *Genome Research, 25,* 1, 2015.

Climatologie Le vêlage des glaciers mis sur écoute

Dans un vacarme assourdissant, le glacier de Hans se brise dans un fjord norvégien, sous forme d'icebergs. Des géophysiciens de l'Institut de géophysique de Pologne ont enregistré ce bruit afin de mieux comprendre le vêlage, phénomène de fragmentation du front des glaciers. Après trois jours de mesures et 20 événements de vêlage, ils ont différencié trois types de morcellement de la glace dans l'océan. *« Ces résultats donnent de bons espoirs de calculer les volumes perdus par les glaciers »*, explique Olivier Gagliardini, du Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement de Grenoble. Ces données sont précieuses car, dans le contexte du réchauffement climatique, la fonte des glaciers et des calottes polaires participe à près de la moitié de l'élévation du niveau marin, selon le dernier rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Et pour prédire le comportement des glaciers, les modélisateurs manquent encore d'informations. Ainsi, on sait seulement depuis peu que les vitesses d'écoulement de certains glaciers du Groenland ont doublé ou triplé en vingt ans.

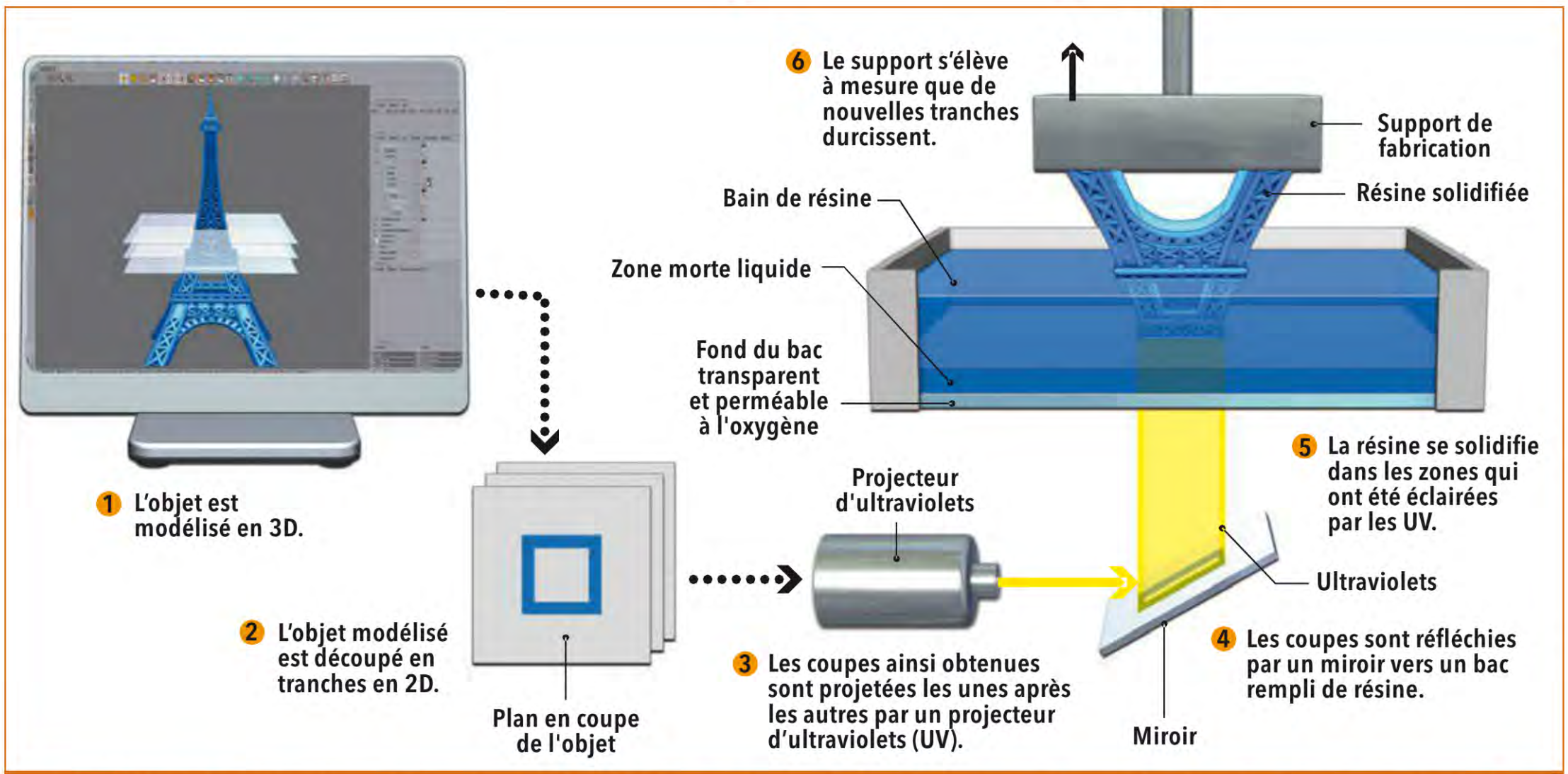
© MARCOS BRINDICCI/ REUTERS

DES ICEBERGS se détachent d'un glacier de Patagonie, en Argentine. En analysant les sons recueillis par des hydrophones lors de telles chutes, les glaciologues comprennent mieux ce phénomène de vêlage.

Les géophysiciens ont montré que l'énergie d'impact de la glace dans l'océan est liée à une signature acoustique particulière, pour deux types de vêlage sur trois. Après cette première conclusion, l'étude devra être menée sur des périodes plus longues. *« Ce serait très utile que ce protocole soit ajusté pour de grands glaciers, tels ceux de l'Antarctique, car leur réponse aux variations climatiques par vêlage des icebergs est certainement sous-estimée »*, commente Didier Roche, du laboratoire des sciences du climat et de l'environnement de Paris. ■ **Marine Bollard**

[1] O. Glowacki *et al.*, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1002/2014GL062859, 2015.

Technologie Record de vitesse pour une imprimante 3D



UN NOUVEAU TYPE D'IMPRIMANTE 3D imprime de 20 à 100 fois plus vite que les modèles existants. Une rapidité due à la photopolymérisation d'une résine liquide : au contact d'un rayon lumineux, cette résine se solidifie. De plus, le fond du bac est perméable à l'oxygène qui a pour effet de bloquer la photopolymérisation. Il en résulte une « zone morte », une fine couche où la résine reste liquide, ce qui permet l'approvisionnement de l'imprimante en continu. Texte : Thibault Panis ; Infographie : Bruno Bourgeois ; Source : J. R. Tumbleston *et al.*, *Science*, *347*, 1349, 2015.

→ Bref

→ ASTRONOMIE

Galaxie précoce

Aux confins de l'Univers, le télescope Alma, situé au Chili, a perçu le rayonnement très faible d'une galaxie qui venait de naître. Problème, cette toute jeune galaxie contient des poussières et des éléments lourds caractéristiques de galaxies plus âgées. Une précocité qui étonne les astronomes.

D. Watson *et al.*, *Nature*, doi:10.1038/nature14164, 2015.

→ ZOOLOGIE

Épouvantail à éléphants

Comment empêcher les éléphants de pénétrer de nuit dans les fermes en Inde ? À l'aide d'un dispositif diffusant des rugissements de tigre. La méthode est un succès à 90 %. Les rugissements de tigre se révèlent ainsi plus efficaces que ceux de panthère (73 % de succès) ou que les cris humains (57 %).

V. Thuppil et R. Coss, *Oryx*, doi:10.1017/S0030605314000635, 2015.

→ CHIMIE

Vieille pinte conservée au frais

Une odeur de fromage bien fait et de chèvre, voilà ce que sent l'une des plus vieilles bières préservées au monde. Brassée il y a plus de cent soixante-dix ans, elle a été retrouvée dans la cargaison d'une goélette naufragée dans les années 1840, dans la mer Baltique, près des côtes finlandaises. L'objectif de l'analyse : en savoir plus sur la boisson et l'évolution des techniques de fabrication.

J. Londesborough *et al.*, *J. Ag. Food. Chem.*, doi:10.1021/if5052943, 2015.

Neurosciences

« Les ultrasons réduisent les plaques amyloïdes associées à la maladie d'Alzheimer »

Philippe Amouyel est professeur de médecine à Lille et directeur de la Fondation Plan Alzheimer.

Une équipe australienne vient de montrer que l'on peut éliminer les plaques amyloïdes caractéristiques de la maladie d'Alzheimer chez des souris génétiquement modifiées. Comment a-t-elle procédé ?

P.A. Son objectif était d'étudier l'ouverture de la barrière hémato-encéphalique qui joue le rôle d'interface entre les vaisseaux sanguins et le cortex cérébral. Cette barrière protège le cerveau des produits toxiques, mais elle empêche aussi les médicaments de pénétrer dans le cortex, ce qui freine le traitement des maladies du cerveau. Pour l'ouvrir, l'équipe a eu recours à une technique déjà éprouvée, qui consiste à appliquer un faisceau d'ultrasons sur le cerveau, à l'aide d'une sonde posée sur le crâne, tout en injectant simultanément des microbulles de gaz dans le sang. Sous l'action répétée des ultrasons, les bulles se dilatent et se contractent. Cette pression finit par distendre les parois des vaisseaux, ce qui permet alors aux molécules véhiculées par le sang de pénétrer dans le cortex.

Sur quel type de souris a-t-elle appliqué cette méthode ?

P.A. Elle a utilisé des souris génétiquement modifiées pour mimer l'un des signes majeurs de la maladie d'Alzheimer : l'accumulation de protéines bêta-amyloïdes sous forme de plaques dans le cortex. Ces souris présentaient aussi des déficits dans trois tests couramment utilisés pour mesurer la mémoire. Quand les souris ont atteint l'âge de 12 mois, les chercheurs ont appliqué le traitement par ultrasons cinq fois par jour pendant six jours sur l'ensemble de leur cortex, sans ajouter aucun traitement médicamenteux. Le résultat fut sans appel : la quantité de plaques amyloïdes a régressé de 75 %. Et les souris ont significativement amélioré leurs scores aux tests de mémoire.

Comment expliquer un tel résultat ?

P.A. En disséquant le cerveau de ces souris, ils ont constaté une augmentation de l'activité des cellules microgliales, les macrophages du cerveau. Et ils ont observé que cette « microglie » avait éliminé les plaques amyloïdes. L'hypothèse est la suivante : l'ouverture de la barrière hémato-encéphalique faciliterait l'entrée dans le cortex d'une protéine sanguine, l'albumine, connue pour favoriser l'activation des microgliales, ce qui causerait l'élimination des plaques.

Les ultrasons ne peuvent-ils pas endommager le cerveau ?

P.A. Effectivement, les ultrasons sont des ondes de choc qui peuvent provoquer des lésions cérébrales. Toutefois, les chercheurs ont réduit au maximum leur intensité afin d'éviter ce type de dégât. En activant la microglie, le traitement aurait pu aussi déclencher un phénomène inflammatoire dans le cerveau. Mais ils n'en ont pas constaté. Au moins chez la souris, cette méthode par ultrasons semble sans effets secondaires.

Peut-on imaginer la transposer à l'homme ?

P.A. Ce traitement « mécanique » est une piste originale à suivre. Il faudra prouver qu'il est efficace chez l'homme et valider son innocuité. Un premier obstacle existe : traverser notre épaisse boîte crânienne, ce qui nécessitera d'augmenter l'intensité des ultrasons avec le risque de provoquer des lésions. Second risque : laisser pénétrer dans le cerveau des substances toxiques en ouvrant la barrière hémato-encéphalique. ■

Propos recueillis par Marie-Laure Théodule

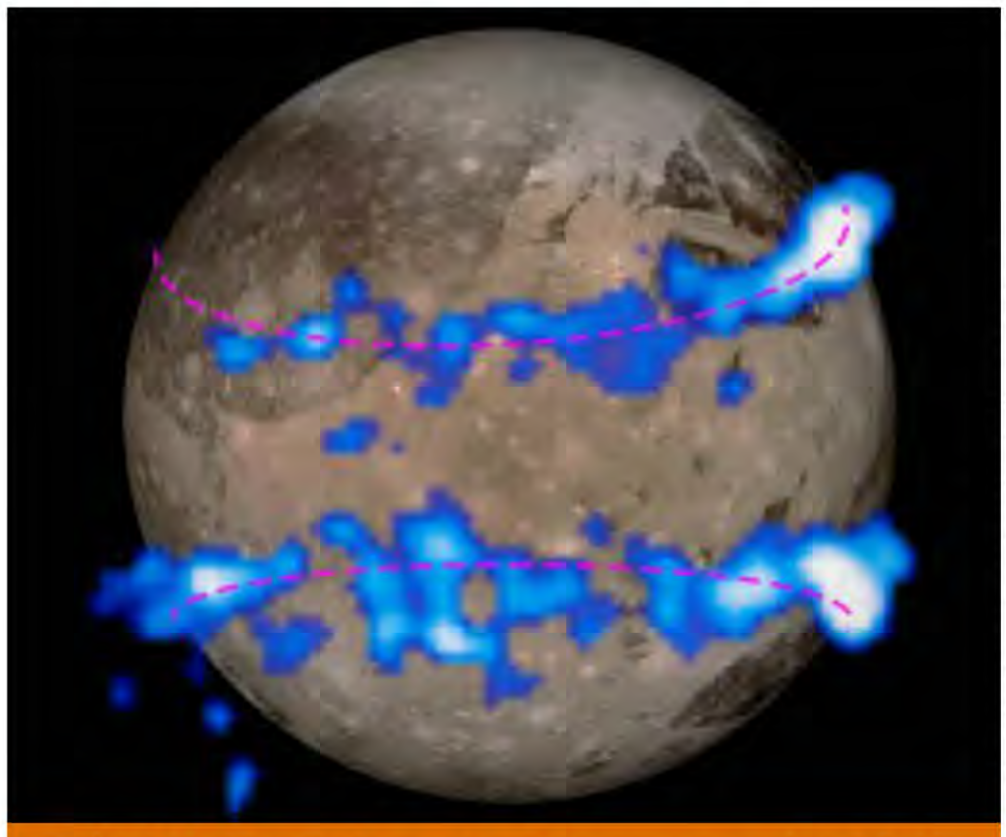
[1] G. Leinenga et J. Götz, *Sci. Transl. Med.*, *7*, 278ra33, 2015.

© D.R.

Astronomie

De l'eau cachée dans les satellites

Ganymède, la plus grande lune de Jupiter, abriterait sous une épaisse couche de glace un océan contenant plus d'eau que tous ceux de la Terre réunis. Cet océan, de 100 kilomètres d'épaisseur et enterré sous une croûte de 150 kilomètres, a été découvert début mars à l'aide du télescope spatial Hubble, grâce à l'analyse du champ magnétique de l'astre [1]. Cette caractéristique, unique parmi les satellites du système solaire, explique l'observation d'aurores sur Ganymède, versions exotiques des aurores boréales de la Terre.
Ces aurores ont déjà été observées par la sonde américaine Galileo dans les années 1990.
À l'époque, les astronomes avaient noté que leur position oscillait, et ils avaient calculé que la variation devrait être d'environ 6 degrés de latitude. La raison ? Le champ magnétique de Jupiter interfère avec celui de Ganymède. Or les observations récentes de Hubble ont montré une variation de 2 degrés. Cela ne peut pas être dû à la seule interaction avec le champ magnétique jovien.
L'équipe de Joachim Saur, de l'université de Cologne, en Allemagne, a supposé l'existence d'un fluide électrique conducteur, tel un océan d'eau salé. Cette présence crée un champ magnétique secondaire qui contrebalancerait l'influence du champ magnétique de Jupiter et stabiliserait les oscillations.



© NASA, ESA AND J.SAUR (UNIV. OF COLOGNE, GERMANY)

LE TÉLESCOPE HUBBLE enregistre le rayonnement ultraviolet des aurores de Ganymède, satellite de Jupiter. Leurs oscillations s'expliquent par la présence d'un océan caché sous la croûte.

Silice sur Encelade.
Cette découverte coïncide avec celle d'un autre océan, sur Encelade, satellite de Saturne. La sonde européenne Cassini-Huygens a en effet détecté des particules de silice de quelques nanomètres [2]. Ce type de particules ne peut se former que par des processus hydrothermaux. Ce qui implique la présence d'eau chaude à l'intérieur d'Encelade, éjectée sous forme de geysers. Ceux-ci étaient connus depuis 2005, mais la présence de silice renforce l'idée selon laquelle Encelade contient aussi un océan liquide sous sa croûte glacée.
Ces océans excitent les astronomes. « *Ces satellites de glace nous intéressent, car la présence d'eau liquide permet d'envisager une vie sous la surface ; le système solaire pourrait abriter ainsi des habitats potentiels !* » explique Athena Coustenis, planétologue au CNRS.
À l'aide de futurs télescopes plus puissants, l'étude des aurores sur les exoplanètes pourra révéler la présence éventuelle d'eau liquide autour d'autres étoiles que le Soleil. Mais en attendant de rechercher de la vie si loin, des missions telle Juice (Jupiter Icy Moons Explorer) de l'Agence spatiale européenne, qui doit être lancée en 2022, examinera dans quelle mesure les lunes de Jupiter, et en particulier Ganymède, sont susceptibles d'abriter de la vie. ■

Gabrielle Carpel

[1] J. Saur et *al.*, *J. Geophys. Res. Space Physics*, doi:10.1002/2014JA020778, 2015.
[2] H.-W. Hsu *et al.*, *Nature, 519*, 207, 2015.

→ Bref

→ ARCHÉOLOGIE
Camp fortifié

Un camp romain fortifié datant du IIe siècle av. J.-C vient d'être découvert par des chercheurs italiens près de Trieste, en Italie. Une cartographie tridimensionnelle par laser a révélé de petits changements d'altitude caractéristiques des anciennes structures souterraines du camp.

F. Bernardini *et al.*, doi:10.1073/pnas.1419175112, 2015.

→ CLIMATOLOGIE
Gourmands pollueurs !

Les insectes se nourrissant des feuilles des arbres dans les forêts tempérées augmentent leur consommation lorsque le niveau de CO_2 dans l'atmosphère s'élève, selon une équipe de l'université de Wisconsin-Madison, aux États-Unis. À terme, cet excès de gourmandise pourrait limiter la capacité des forêts à agir comme des puits à carbone.

J.J. Couture *et al.*, *Nat. Plants*, doi:10.1038/nplants.2015.16, 2015.

→ PALÉONTOLOGIE
Les dents de l'Algarve

Au Portugal, des paléontologues ont identifié une nouvelle espèce d'amphibien de 3 mètres de long, disparu depuis 240 millions d'années. Nommé *Metoposaurus algarvensis*, ce carnassier semblable à une salamandre disposait de centaines de dents acérées et peuplait les eaux douces tropicales.

S. Brusatte *et al.*, *J. Vert. Paleo.*, doi :10.1080/02724634.2014.912988, 2015.

© JOANA BRUNO

Patagonie & Terre de Feu

· du 2 au 18 janvier 2016 depuis Paris ·

Embarquez pour une croisière inoubliable !

> **Des escales authentiques : Argentine, Chili, Uruguay**
> Le mythe du Cap Horn, le détroit de Magellan...
> Un **accompagnement francophone** depuis Paris
> Un riche **programme de conférences****: Histoire, glaciers...
> À bord d'un **navire raffiné** : Le Celebrity Infinity****

Retrouvez le programme détaillé dans notre brochure

En partenariat avec Celebrity Cruises

Un panorama magnifique de l'Amérique du Sud

À partir de 4 290 €* - Tout compris - Vols inclus

Au départ de Paris - Du 2 au 18 janvier 2016 à bord du Celebrity Infinity**

3 possibilités pour recevoir/télécharger la documentation :

> Connectez-vous sur www.croisieres-exception.fr/patagonie
> Appelez le 01 75 77 87 48 du lundi au vendredi de 10h à 13h
> Renvoyez le coupon ci-dessous

* Prix par personne en cabine int. base double incluant les vols A/R depuis Paris, la pension complète, les conférences, les taxes et pourboires

CGV Services - Croisière « Patagonie & Terre de Feu » - 53 rue du Théâtre - 75015 Paris

❑ Mme ❑ M. Nom : ..... Prénom : .....

Adresse : .....

Code postal : ⌊_⌊_⌊_⌊_⌊_ Ville : .....

Date de naissance : ⌊_⌊_ ⌊_⌊_ ⌊_⌊_⌊_⌊_ Tél. : ⌊_⌊_ ⌊_⌊_ ⌊_⌊_ ⌊_⌊_ ⌊_⌊_

Email : .....@.....

Conformément à la loi "Informatique et Liberté" du 6 janvier 1978, nous vous informons que les renseignements ci-dessus sont indispensables au traitement de votre commande et que vous disposez d'un droit d'accès, de modification, de rectification des données vous concernant. LR0415

**Photo : Shutterstock - Cette croisière est organisée par RCL Cruises LTD - IM075110178

***Programme garanti à partir de 50 inscrits sauf cas de force majeure - Photo : Shutterstock

Santé Une « vaccination naturelle » contre les allergies alimentaires

Faut-il éviter de donner des cacahuètes aux enfants qui montrent les premiers signes d'une allergie ? Aux États-Unis, la phobie de l'arachide est telle que l'aliment et ses dérivés ont été interdits dans certaines écoles. Pourtant, une étude britannique vient de montrer que son éviction peut être contre-productive [1]. Les chercheurs ont suivi 640 enfants âgés de 4 à 11 mois, jusqu'à leur cinquième anniversaire, atteints d'eczéma sévère et/ou d'allergie aux œufs, après les avoir répartis en deux groupes selon leur réaction à un test cutané à base de cacahuète. Ceux qui avaient développé une papule au point de contact étaient considérés comme « sensibilisés » à l'arachide, donc prédisposés à l'allergie. Dans chaque groupe, la moitié des parents devait incorporer 6 grammes d'arachide par semaine dans l'alimentation du nourrisson, tandis que l'autre moitié devait l'exclure. Quand les jeunes patients ont atteint l'âge de 5 ans, les chercheurs ont évalué les symptômes allergiques lors de l'exposition à de fortes doses de cacahuète. Chez les enfants « sensibilisés », ils ont observé une proportion plus faible d'allergies dans le sous-groupe ayant consommé périodiquement de l'arachide (11 %) que dans celui qui l'avait exclu (35 %). Un effet similaire a même été mesuré parmi les enfants « non sensibilisés ». Pour Jocelyne Just, chef du service d'allergologie pédiatrique de l'hôpital Armand-Trousseau, à Paris, *« ces travaux prouvent l'existence d'une fenêtre d'âge – jusqu'à un an – pendant laquelle diversifier l'alimentation rend possible une sorte de vaccination naturelle »*. ■

Pierre Martin

[1] G. Du Toit et *al.*, *N. Eng. J. Med.*, *372*, 803, 2015.

Climat La forêt amazonienne absorbe de moins en moins de CO_2

Plus de vingt ans : c'est le temps qu'il aura fallu pour mesurer l'évolution du diamètre de plus de 200 000 arbres, répartis sur 321 parcelles de la forêt amazonienne. Conclusion de cet inventaire qui a mobilisé plus de 100 chercheurs ? Le taux de mortalité des arbres de la jungle sud-américaine a augmenté d'un tiers. En conséquence, *« la forêt amazonienne absorbera de moins en moins le CO_2 émis par nos activités industrielles »*, déplore Jérôme Chave, du laboratoire Évolution et diversité biologique du CNRS, à Toulouse, et coauteur de l'étude. Jusqu'à présent, les modèles climatiques considéraient que l'augmentation du CO_2 atmosphérique était en partie compensée par la fixation de ce même carbone dans le bois ou les feuilles, grâce à la photosynthèse. Cet effet fertilisant du CO_2 participait à la croissance naturelle de la forêt. Or, selon Jérôme Chave, cette capacité de stockage du CO_2 s'affaiblit depuis les années 1990 car les arbres meurent plus vite. Ceci risque d'amplifier le réchauffement climatique, lié à nos émissions de CO_2 et de méthane. La vulnérabilité de la forêt tropicale pourrait s'expliquer par les sécheresses répétées de ces dernières années. Une hypothèse qui reste à vérifier. Pour Philippe Ciais, spécialiste des cycles du carbone, *« il est dorénavant primordial de modéliser les processus écologiques comme la mortalité des arbres ou la compétitivité entre espèces végétales pour évaluer l'évolution de la capacité future d'absorption du CO_2 par la forêt amazonienne »*. ■

Marine Bollard

[1] *Brienen et al., Nature,* doi:10.1038/nature14283, 2015.

→ Bref

→ PALÉONTOLOGIE
Tous égaux

Des paléontologues espagnols ont analysé les stries et les chocs sur les dents d'une vingtaine de Néandertaliens pour mieux connaître leur répartition des tâches. Les hommes de Neandertal utilisaient en effet leur mâchoire pour cuisiner, confectionner des habits, etc. Résultat : hommes et femmes mettaient tous la main à la pâte.

A. Estalrrich et A. Rosas, *J. Hum. Evol.*, *80*, 51, 2015.

→ NEUROLOGIE
Répertorier les cellules cérébrales

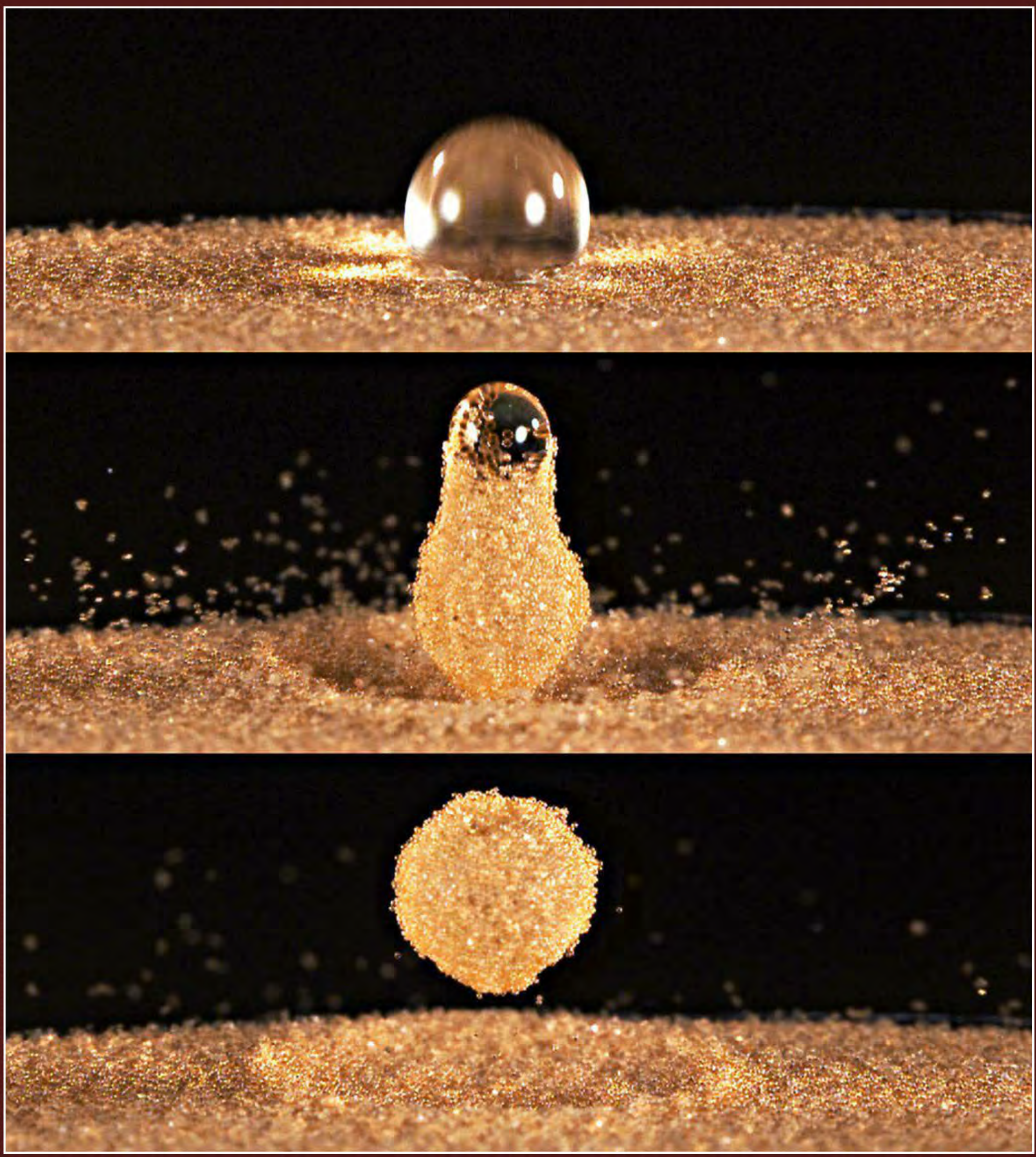
Une équipe de l'institut Karolinska, à Stockholm, en Suède, a analysé individuellement le génome de 3 000 cellules prélevées dans le cortex d'un cerveau de souris. Dans cette première cartographie génomique des cellules du cerveau, ils ont ainsi identifié et répertorié 47 cellules différentes, dont certains sous-types jusqu'alors inconnus.

A. Zeisel *et al.*, *Science*, doi : 10.1126/science.aaa1934. 2015.

→ PHYSIQUE
Ajustement fin

Neutron et proton, les deux constituants du noyau atomique, ont une masse légèrement différente - le neutron est plus lourd de 0,14 %. Une équipe internationale explique ce petit écart par une masse bien supérieure des quarks qui composent le neutron, compensée en partie par le champ électrique du proton qui augmente la masse effective de ce dernier.

S. Borsanyi *et al.*, *Science*, doi : 10.1126/science.1257050, 2015.



© XIANG CHENG/ DPT OF CHEMICAL ENGINEERING AND MATERIALS SCIENCE/ UNIVERSITY OF MINNESOTA

Physique

La goutte d'eau : météorite de laboratoire

On peut observer ce phénomène chaque fois qu'il pleut, mais ces clichés à haute vitesse lui donnent une toute autre allure. Il s'agit d'une goutte d'eau de 3 millimètres de diamètre rebondissant sur des billes de verre de 90 micromètres. Des chercheurs de l'université du Minnesota, aux États-Unis, ont analysé précisément son impact [1]. Leur conclusion est surprenante : le cratère engendré est très similaire à celui que ferait une météorite en s'écrasant sur Terre, quoiqu'à une échelle bien moindre. Cette analogie leur a permis de faire appel à différents modèles physiques pour comprendre finement le phénomène. **Thibault Panis**

[1] R. Zhao *et al.*, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, *112*, 342, 2015.

Paléontologie

Neandertal, orfèvre bien avant *sapiens*

Ce sont huit serres d'aigle à queue blanche, provenant du site de Krapina, en Croatie. Pour le groupe de paléo-anthropologues croates et américains qui vient de les analyser [1], elles forment un ensemble exceptionnel : elles auraient été portées en collier par Neandertal, il y a 130 000 ans. Un bijou qui l'imposerait comme une espèce sensible à la symbolique et à l'art, comme *Homo sapiens*.

Ces serres sont quasiment les seuls restes d'oiseaux trouvés sur le site. Elles présentaient donc une valeur particulière non alimentaire. Ces serres portent des traces, nettes, de désarticulation, lorsqu'on les a séparées du corps de l'animal, ainsi que de polissage. Ces dernières traces résulteraient des frottements qu'elles exerçaient les unes sur les autres une fois montées en collier.

« *Plusieurs serres de rapaces ont été répertoriées dans des sites néandertaliens en Europe,* indique Véronique Laroulandie, du laboratoire de la Préhistoire à l'actuel, culture, environnement, anthropologie, à Bordeaux. *Mais c'est la première fois qu'on en identifie autant au même endroit et dans un site aussi ancien.* » Rien ne prouve cependant que les huit serres aient été portées ensemble. « *Elles sont issues d'une collection de fouilles qui date de plus d'un siècle et on n'a pas d'indication sur la proximité des griffes dans la grotte.* »

Les fossiles répertoriés attestent en revanche que le site n'a été occupé que par des Néandertaliens, il y a 130 000 ans, alors que *sapiens* n'avait sans doute pas encore quitté l'Afrique. L'idée selon laquelle Neandertal lui devrait sa sensibilité artistique semble définitivement battue en brèche. ■

CES SERRES D'AIGLE ont été retrouvées dans une grotte de Croatie. La datation et les traces de polissage indiquent qu'elles ont pu être rassemblées en collier, porté par Neandertal voici 130 000 ans. © LUKA MJEDA (ZAGREB)

Anne Debroise

[1] D. Radovčić *et al.*, *PLOS ONE*, doi: 10.1371.journal.pone.0119802, 2015.

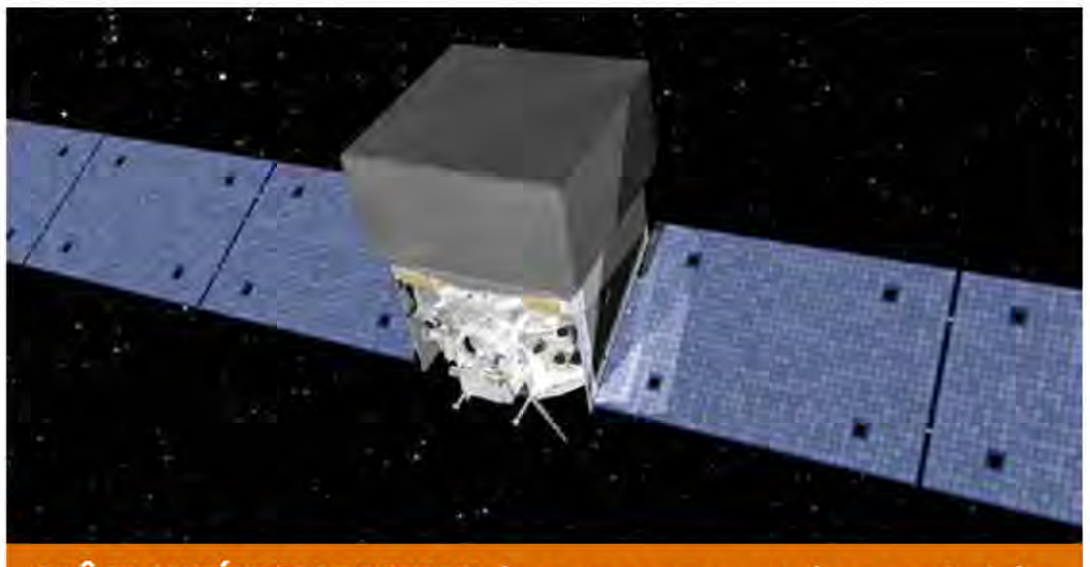
Physique

Einstein a encore raison

En 1905, dans sa théorie de la relativité restreinte, Albert Einstein prédisait que les particules lumineuses, ou photons, se propagent toutes à la même vitesse – celle de la lumière, soit environ 300 000 kilomètres par seconde –, quelle que soit leur énergie. La confirmation en a été apportée, pour la première fois, par une équipe internationale de physiciens dirigée par Tsvi Piran, de l'université hébraïque de Jérusalem, en Israël [1].

Les physiciens ont étudié, à l'aide du télescope spatial Fermi, un phénomène exceptionnellement lumineux, un sursaut gamma. Baptisé GRB090510, celui-ci s'est produit à 7 milliards d'années-lumière de la Terre ; il se caractérise notamment par sa brièveté (environ 1 seconde) et la production de photons de très haute énergie – jusqu'à 31 gigaélectronvolts. Plusieurs centaines de photons, dont le niveau d'énergie est compris entre plusieurs centaines de kiloélectronvolts et quelques gigaélectronvolts, ont servi à l'analyse. Les chercheurs se sont focalisés sur le temps que mettaient ces photons pour parvenir jusqu'à la Terre. L'analyse montre que tous sont arrivés en même temps, à quelques fractions de seconde près, malgré des énergies très différentes. C'est la meilleure mesure actuelle du fait que la vitesse de la lumière est indépendante de l'énergie.

Pour les chercheurs, le niveau de certitude de leur analyse (95 %) laisse peu de place à l'existence d'une structure à l'espace-temps à l'échelle microscopique. Cette hypothèse, émise en 1955 par le physicien américain John Wheeler, afin de corriger la relativité restreinte à cette échelle infime, proposait que les photons, en traversant cette structure, soient plus ou moins ralentis en fonction de leur énergie. ■



GRÂCE AU TÉLESCOPE FERMI, les astronomes ont chronométré des photons d'énergie différente provenant d'un sursaut gamma lointain. Ils en ont conclu que la vitesse de la lumière est constante, quelle que soit l'énergie. © NASA

Vincent Glavieux

[1] V. Vasileiou *et al.*, *Nat. Phys.*, doi : 10.1038/NPHYS3270, 2015.

➜ Bref

➜ VERBATIM

« Pour les débuts du LHC en 2010, il était clair que nous devions trouver le boson de Higgs. Pour cette nouvelle étape, c'est comme si nous n'avions ni feuille de route ni GPS. »

John Ellis, professeur de physique théorique au King's College de Londres, dans *Le Monde* du 18 mars 2015.

➜ MÉDECINE

Quatre souches contre la grippe

Pour composer le vaccin contre la grippe, quatre souches de virus valent mieux que trois. Mettre deux souches de type A et deux autres de type B permettrait à l'organisme de produire plus d'anticorps. C'est ce que révèle une étude américaine comparative menée sur l'homme.

G. Gorse *et al.*, *Vaccine*, *33*, 1151, 2015.

➜ CHIMIE

ADN sélectif

En liant des brins d'ADN à du cuivre, des chimistes français ont obtenu un catalyseur qui permet de réaliser une vaste gamme de réactions dites « stéréosélectives ». Le but ? Créer des molécules associées deux à deux que l'on utilise comme médicaments.

E. Benedetti *et al.*, *Chem. Commun.*, *51*, 6076, 2015.

Indicateur

40 %

de déficit global en eau, c'est ce que l'humanité devra affronter d'ici à 2030 si aucune mesure n'est prise pour mieux gérer cette ressource, selon un rapport de l'ONU.

« Water for a Sustainable World », rapport des Nations unies pour le développement mondial de l'eau, 2015.

Web du mois

L'ONU au chevet du climat

http://newsroom.unfccc.int/fr

L'ONU se met à l'heure du changement climatique : l'organisation inaugure un portail pour fédérer l'actualité mondiale sur le climat, dont celle des énergies propres ou de l'urbanisme durable. Les articles issus de la presse ou d'organisations intergouvernementales côtoient photos et vidéos mises en ligne par tous les acteurs du climat. ➜ ***http://newsroom.unfccc.int/fr***

Neurologie

Des neurones implantés dans le cortex visuel

La greffe de neurones permettra-t-elle, un jour, de guérir les lésions cérébrales dues à un accident ou à une maladie neurodégénérative ? Cette perspective se rapproche avec l'implantation de neurones visuels réalisée récemment sur des souris adultes [1].

La greffe neuronale a certes déjà été pratiquée, y compris chez l'homme, mais les essais, effectués pour certains il y a plus de vingt-cinq ans chez des patients souffrant de la maladie de Parkinson, utilisaient des neurones prélevés sur des fœtus à la suite d'IVG. Une ressource très limitée. D'autres greffes ont été tentées à partir de lignées de cellules souches embryonnaires cultivées en laboratoire. Avec des résultats mitigés. L'expérience d'Afsaneh Gaillard, à Poitiers, et de Pierre Vanderhaeghen, à Bruxelles, semble expliquer pourquoi. Après avoir obtenu, en culture, différents types de neurones spécialisés de l'aire visuelle, les biologistes les ont greffés dans le cortex visuel de souris, à l'endroit précis où il avait subi une lésion. Ces neurones ont rapidement lancé des prolongements, des axones, vers leurs cibles. Au bout d'un an, dans 60 % des cas, ils étaient connectés avec le reste du cerveau, certains répondant même à des flashs lumineux perçus par la rétine. Cette greffe est une première, mais les chercheurs sont allés plus loin. Ils ont aussi vérifié que les tentatives de greffes de neurones moteurs dans le cortex visuel et de neurones visuels dans le cortex moteur conduisaient à l'échec. Une greffe nécessiterait donc, pour réussir, la différenciation préalable des cellules souches en neurones spécialisés de l'aire ciblée. ■

Anne Debroise

[1] K. Michelsen *et al.*, *Neuron*, *85*, 982, 2015.

Mathématiques Deux Américains se partagent le prix Abel

Ce sont deux légendes des mathématiques qui viennent d'être récompensées par le prix Abel, l'un des plus prestigieux prix de mathématiques, qui est décerné par l'Académie norvégienne des sciences et des lettres [1]. John Nash, qui avait reçu le prix Nobel d'économie en 1994 pour ses travaux sur la théorie des jeux, et Louis Nirenberg, premier lauréat du prix Crafoord lors de sa création en 1982.
S'ils ont reçu le prix ensemble, alors qu'ils n'ont jamais publié de travaux en commun, c'est que leur influence mutuelle a été grande. « *Ce sont deux piliers incontournables de l'analyse. Ils ont jeté les bases de l'analyse non linéaire et les outils qu'ils ont construits sont universellement utilisés aujourd'hui* », estime Cédric Villani, directeur de l'institut Henri-Poincaré, à Paris.

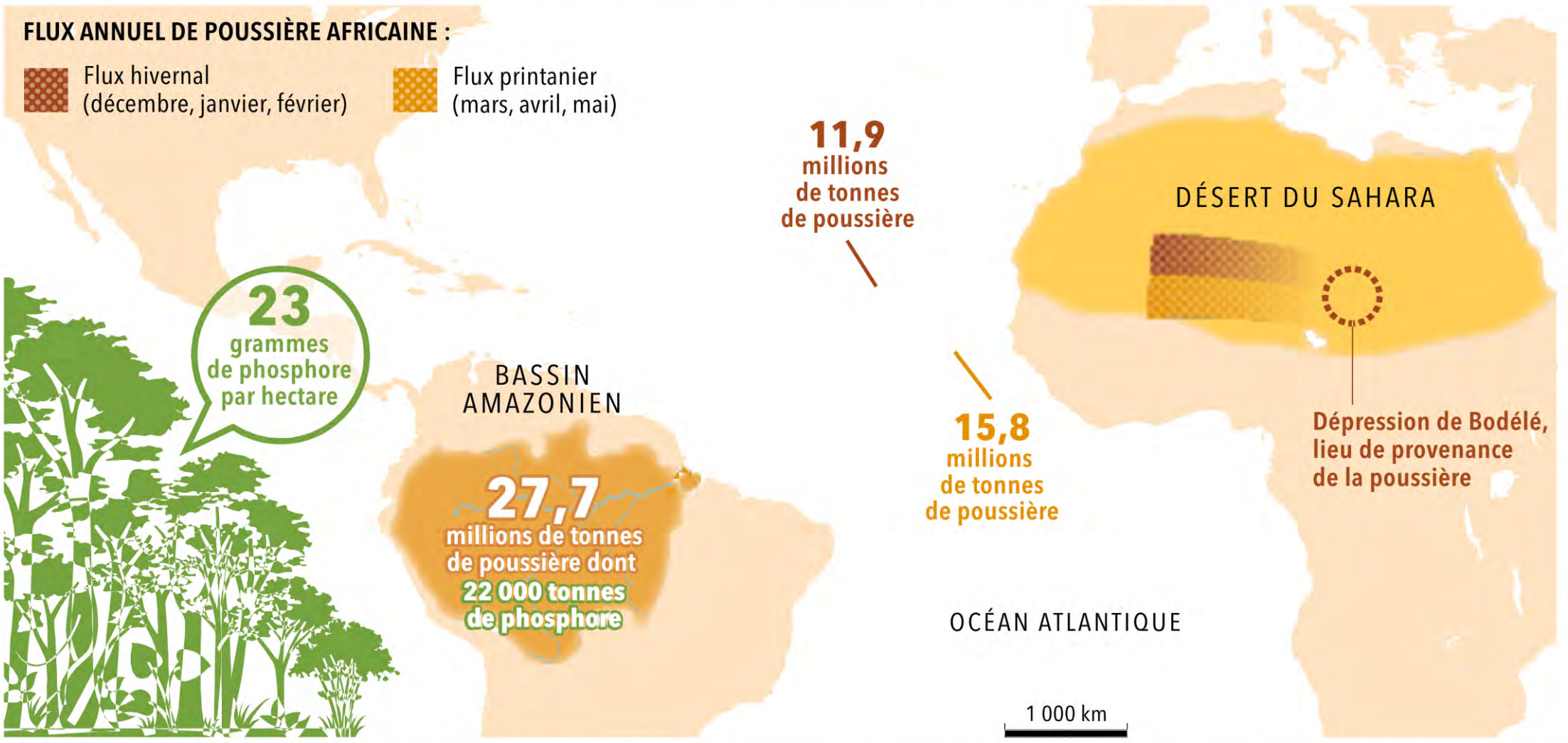
© CHARLES REX ARBOGAST/ AP/ SIPA

© HOLLENSHEAD/ NYU PHOTO BUREAU

JOHN NASH (à gauche, ici en 1994) et **LOUIS NIRENBERG** ont jeté les bases des méthodes utilisées aujourd'hui en analyse non linéaire, lors d'un séjour, en 1951, au Courant Institute de New York. Leur contribution fondamentale leur a valu de recevoir le prix Abel, le 25 mars, à Oslo.

John Nash est connu pour son rôle en théorie des jeux. En 1949, il devient célèbre pour la publication d'un article sur la notion d'équilibre [2]. Une notion si fructueuse qu'elle est à la base de la théorie microéconomique actuelle.
Ensuite, lors d'une carrière qui ne va durer que dix ans, il se distingue par des résultats majeurs en analyse.
Un destin brillant marqué par des circonstances tragiques, puisqu'il est diagnostiqué schizophrène en 1959, maladie dont il ne sortira que dans les années 1990. Son histoire romancée sera portée à l'écran par Ron Howard dans *Un Homme d'exception*, en 2001. Ce sont ses résultats d'analyse, occultés par sa célébrité dans le monde de l'économie, que le prix Abel remet à l'honneur aujourd'hui.
Le destin de Louis Nirenberg est tout autre : cinquante ans de production mathématiques continue, des centaines d'articles importants, plus de 300 descendants en mathématiques. Une carrière qui a inspiré nombre de mathématiciens. Le style des deux hommes

Environnement L'Amazonie fertilisée par le Sahara



La forêt amazonienne est, chaque année, fertilisée par du phosphore provenant d'Afrique, et plus particulièrement de la dépression de Bodélé, dans le Sahara, selon une équipe américaine. Analysant les résultats collectés pendant sept ans par le satellite Calipso, les chercheurs ont trouvé que, chaque année, en moyenne, 27,7 millions de tonnes de poussière, contenant 22 000 tonnes de phosphore, traversent l'Atlantique et se déposent dans le bassin amazonien, soit 23 grammes par hectare. L'étude souligne l'importance de la poussière africaine pour pallier l'épuisement de ce nutriment essentiel dans les décennies à venir. Texte : Bérénice Robert ; Infographie : Hervé Bouilly ; Source : H. Yu *et al.*, *Geo. Res. Letters*, doi:10.1002/2015GL063040, 2015.

est également très différent. Si Louis Nirenberg s'attache à mettre au point des outils dans de grands programmes de recherche, les articles de John Nash sont des coups de théâtre. Ses démonstrations sont très difficiles à suivre. *« Quand vous lisez une démonstration de Nash, vous avez l'impression d'une promenade en forêt : c'est touffu et vous ne savez pas bien où il vous emmène ; et puis, quand vous pensez être complètement perdu, vous arrivez dans une clairière et le château est juste devant vous »*, commente Ivar Ekeland, mathématicien à l'université Paris-Dauphine.

Existence et régularité. Le maître mot de leurs travaux est l'équation aux dérivées partielles, qui décrit le comportement des ensembles de particules, solides ou fluides. Face à de telles équations, le mathématicien s'interroge sur l'existence des solutions, sur leur unicité, etc. Et quand une solution existe, est-elle « régulière », autrement dit le solide ou le fluide « explose-t-il » ou non ? C'est sur ces problèmes d'existence et de régularité que les deux hommes ont obtenu les résultats qui leur valent aujourd'hui les honneurs de leurs pairs.

■ **Philippe Pajot**

[1] www.abelprize.no

[2] J. Nash, *PNAS, 36,* 48, 1950.

→ Bref

→ BIOLOGIE
Culture d'une bactérie intestinale

Pour la première fois, des biologistes français sont parvenus à cultiver en laboratoire une bactérie intestinale qui joue un rôle important dans la maturation du système immunitaire. L'astuce ? Ils l'ont cultivée avec des cellules épithéliales intestinales auxquelles la bactérie s'associe dans une sorte de symbiose.

P. Schnupf *et al., Nature,* doi:10.1038/nature14027, 2015.

→ BIOMÉCANIQUE
La bonne longueur des cils

À quoi servent les cils ? À éviter que l'œil ne se dessèche, selon une équipe américaine d'un laboratoire de biomécanique. En effet, les chercheurs ont constaté que, chez 22 espèces de mammifères, les cils font en général environ un tiers de leur largeur, la taille idéale pour réduire l'évaporation. Les modèles numériques et les expériences en soufflerie sur un œil artificiel confirment cette hypothèse.

G. Amador *et al., J. R. Soc. Interface,* doi: 10.1098/rsif.2014.1294, 2015.

Indicateur
13 millions

de dollars, telle est la valeur de tous les métaux précieux et rares d'origines diverses que l'on pourrait trouver dans les eaux usées d'un million d'Américains.

P. Westerhoff *et al., Environ. Sci. Technol.,* doi:10.1021/es505329q, 2015.

Inserm

cité des sciences et de l'industrie — un lieu universcience

santé en questions

Jeudi 21 mai de 19h à 20h30

Épilepsie :
des traitements pour demain

Un duplex entre la Cité des sciences et de l'industrie à Paris et la médiathèque du Bachut à Lyon

L'incidence de l'épilepsie se situe autour de 50 cas pour 100 000 habitants dans les pays développés. Ce chiffre est plus élevé chez les enfants et les personnes âgées, pourquoi ? Aujourd'hui, 60 à 70% des patients répondent favorablement aux traitements médicamenteux. De nouveaux traitements sont actuellement à l'étude. Quels sont-ils ?

Le public pourra débattre de ces questions avec nos intervenants :

- **Laila Ahddar,** présidente de l'association Epilepsie-France à Paris
- **Gilles Huberfeld,** neurologue à l'hôpital Pitié-Salpêtrière, chercheur au laboratoire Inserm "Épilepsies de l'enfant et plasticité cérébrale" à Paris
- **Julien Jung,** médecin et chercheur au laboratoire Inserm « DYCOG - Dynamique cérébrale et cognition » au Centre de recherche en neurosciences de Lyon

Débat animé par un journaliste de *La Recherche*.

Une conférence citoyenne
entrée gratuite

www.inserm.fr et www.cite-sciences.fr/citedelasante

VILLE DE LYON — Bibliothèque municipale de Lyon — Lyon culture santé

La Recherche — Mairie de Paris — casden banque populaire — pourquoi docteur

Astronomie

Immense Voie lactée

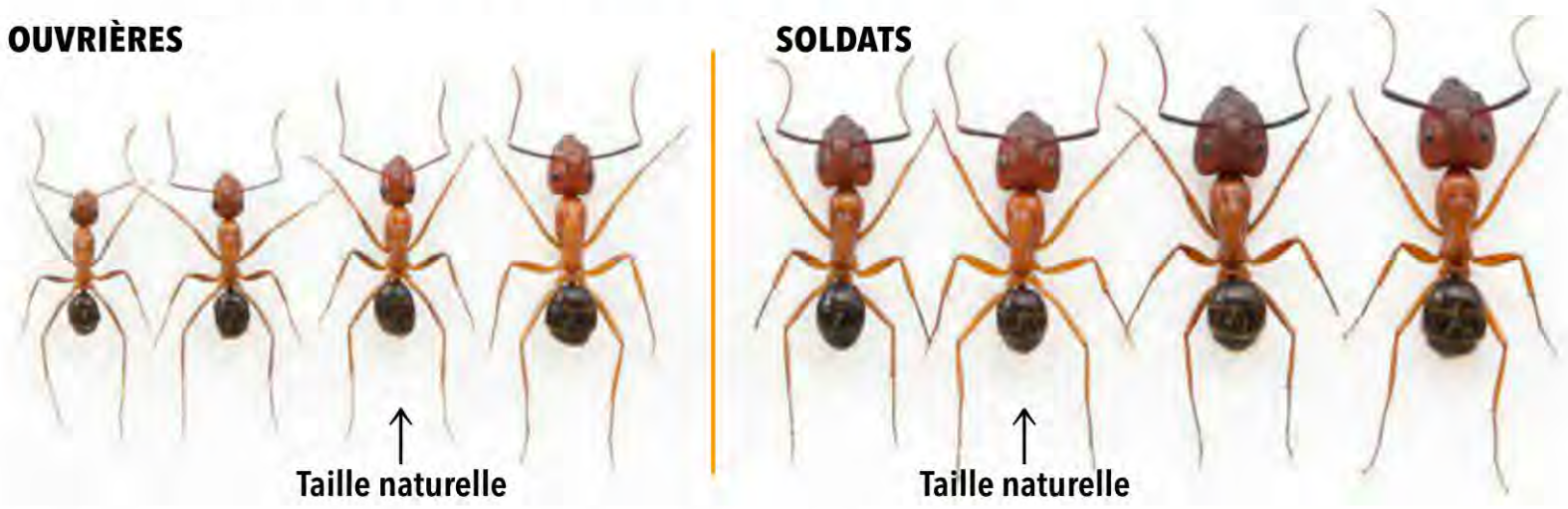
Quelle est la taille de notre galaxie, la Voie lactée ? Une équipe internationale suggère que le disque d'étoiles qui comprend notre Soleil aurait un diamètre non pas de 100 000, mais de 150 000 années-lumière [1]. Pour aboutir à ce chiffre, les astronomes ont réanalysé les données du Sloan Digital Sky Survey, un relevé de plus de 100 millions d'objets célestes commencé en 2000 à l'aide d'un télescope dédié de 2,5 mètres de diamètre. Notre galaxie a la forme d'un gigantesque disque comprenant plusieurs centaines de milliards d'étoiles. Difficile de l'observer et d'en comprendre la structure, car nous sommes à l'intérieur. Les données analysées concernent des astres situés vers l'anticentre de la galaxie, c'est-à-dire à l'opposé de la direction du centre galactique. Certains anneaux d'étoiles déjà connus de cette région étaient considérés jusqu'ici hors de la galaxie. La position de ces anneaux d'étoiles, légèrement en dessous et au-dessus du plan du disque est compatible avec un modèle de disque externe de notre galaxie plissé, comme des ondes se propageant à la surface de l'eau. « *Si ces astronomes ont raison et que ces astres font bien partie de notre galaxie, on peut considérer que celle-ci s'étend jusqu'à un diamètre de 150 000 années-lumière*, admet Nicolas Prantzos, de l'Institut d'astrophysique de Paris. *En revanche, cette extension contient trop peu d'étoiles pour que cela change fondamentalement la masse du disque.* » ■ **Philippe Pajot**

NOTRE GALAXIE SERAIT 50 % PLUS GRANDE que ce qu'on estimait, et sa partie externe serait ondulée, comme représenté sur cette image d'artiste. Une conclusion qui résulte d'une analyse fine d'un relevé du ciel. © RENSSELAER POLYTECHNIC INSTITUTE

[1] Y. Xu *et al.*, *ApJ*, *801*, 105, 2015.

Épigénétique

Comment agrandir les fourmis



Des biologistes canadiens sont parvenus à doubler la taille de fourmis. Ce résultat est remarquable, car il a été obtenu grâce à une simple modification de l'environnement chimique de l'ADN des larves [1]. Dans une colonie de fourmis, chaque larve naît avec un même potentiel génétique mais, suivant la caste dans laquelle elle se retrouve, celui-ci ne s'exprime pas de la même façon. Ainsi, dans l'espèce des fourmis charpentières de Floride utilisées pour l'expérience, les soldats qui protègent la colonie sont plus grands d'un demi-millimètre que les ouvrières. Pour définir précisément l'origine de ces variations, l'équipe a analysé l'ADN de ces catégories de fourmis. Ils ont constaté que l'ADN des soldats était plus méthylé que celui des ouvrières. Cela signifie que l'ordre des nucléotides qui composent l'ADN n'a pas changé, mais qu'à certains endroits de la chaîne, des groupements méthyl faits de carbone et d'hydrogène se sont ajoutés. Cette méthylation de l'ADN a manifestement changé l'expression du gène responsable de la croissance. Pour le vérifier, les chercheurs ont injecté, chez des larves de fourmi pas encore différenciées, un agent qui favorise la méthylation de l'ADN. Résultat : lorsque le taux de méthylation était doublé, la taille des fourmis était augmentée de 70 %. Ces travaux démontrent comment l'environnement agit sur l'expression des gènes. Dans le cas des fourmis, c'est la composition du régime alimentaire qui ferait varier l'environnement chimique de l'ADN. ■ **Mathias Germain**

EN MODIFIANT l'environnement chimique de l'ADN de larves de fourmis, les biologistes sont parvenus à modifier la taille des adultes.

[1] S. Alvarado *et al.*, *Nat. Commun.*, doi:10.1038/ncomms7513, 2015.

© MELANIE COUTURE & DOMINIC QUELLETTE/MCGILL UNIVERSITY, DPT OF BIOLOGY

Un nouveau souffle pour le Human Brain Project ?

Le projet européen sur le cerveau a pris un nouveau départ. Son comité directeur a en effet accepté de faire des réformes.

Le Human Brain Project (HBP) va-t-il repartir sur de bonnes bases ? Son comité directeur a en tout cas adopté à l'unanimité le 18 mars les recommandations d'un comité de médiation. Il avait été nommé en septembre 2014, à la suite de la revue du projet par des arbitres de la Commission européenne et de la publication, en juillet, d'une lettre ouverte signée par près de 800 neuroscientifiques. Cette lettre dénonçait notamment la gouvernance trop centralisée du projet scientifique phare de l'Union européenne, lancé seulement quelques mois plus tôt, fin 2013, et l'intention – très contestée – du comité exécutif du HBP de mettre à l'écart les sciences cognitives à partir de 2016. Les critiques ont été entendues et font partie des recommandations soumises et acceptées par l'HBP. « *Le comité exécutif, composé des trois codirecteurs a d'ailleurs déjà été dissous* », explique Alain Destexhe, membre du comité directeur. Dorénavant, la gouvernance sera assurée par un groupe composé d'anciens et d'actuels responsables d'organisations scientifiques internationales. Les neurosciences devraient aussi être réintégrées avec un budget doublé.

© RALPH ORLOWSKI/ REUTERS

HENRY MARKRAM, le coordinateur controversé du projet à un milliard d'euros destiné à modéliser le cerveau, fait face à la fronde de ses collègues.

« *J'ai un avis très positif sur ce document, dans la mesure où le HBP est prêt à tout appliquer* », commente Alexandre Pouget, corédacteur de la lettre ouverte, sans pour autant cacher quelques inquiétudes. La simulation du cerveau humain, au cœur du projet, est par exemple jugée irréalisable par une grande partie de la communauté scientifique, au vu des connaissances actuelles. Or, pour le moment, cette simulation reste au centre du HBP, « *ce qui va à l'encontre des observations contenues dans le rapport* », pointe Alexandre Pouget.

→ PESTICIDES

L'interdiction votée

Le 19 mars, l'Assemblée nationale a voté l'interdiction des pesticides néonicotinoïdes, connus pour leur toxicité chez les abeilles. Elle sera effective en janvier 2016. Les députés ont adopté un amendement proposé par les socialistes Gérard Bapt et Delphine Batho, contre l'avis du gouvernement. En effet, selon la ministre de l'Écologie Ségolène Royal, *« le cadre européen ne permet pas une interdiction stricte »*.

→ BIODIVERSITÉ

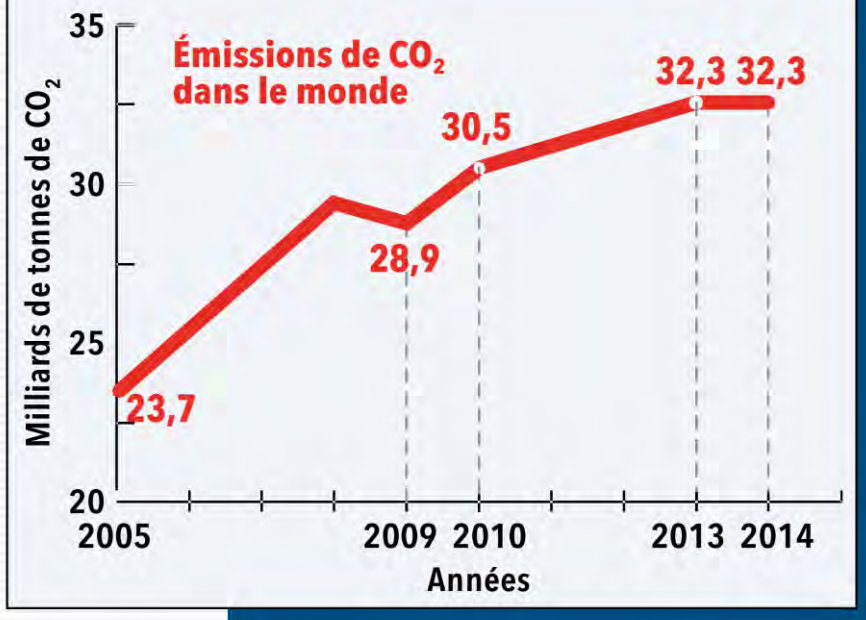
Projet de loi adopté

Le projet de loi pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages voté en première lecture à l'Assemblée nationale le 24 mars dernier, a été adopté à une large majorité, par 325 voix contre 189. Le texte, qui comprend 73 articles, prévoit notamment la création d'une Agence française pour la biodiversité, dotée de plus de 200 millions d'euros. Le projet doit maintenant être examiné au Sénat, où l'UMP, majoritaire, pourrait changer la donne.

→ CLIMAT

Les émissions de CO_2 stagnent en 2014

Les rejets de CO_2 dans l'atmosphère, dus à la combustion d'énergie, ont stagné à 32,3 milliards de tonnes en 2014, d'après l'Agence internationale de l'énergie. C'est la première fois depuis quarante ans que la stagnation des émissions va de pair avec la croissance économique. Pour l'Agence, cette situation résulterait du développement des énergies renouvelables, en particulier en Chine. Les émissions ont déjà stagné ou diminué à trois reprises ces quarante dernières années (au début des années 1980, en 1992 et en 2009), mais le contexte économique était bien différent, et la croissance inexistante. Source : http://tinyurl.com/AIE-CO_2



Dossier

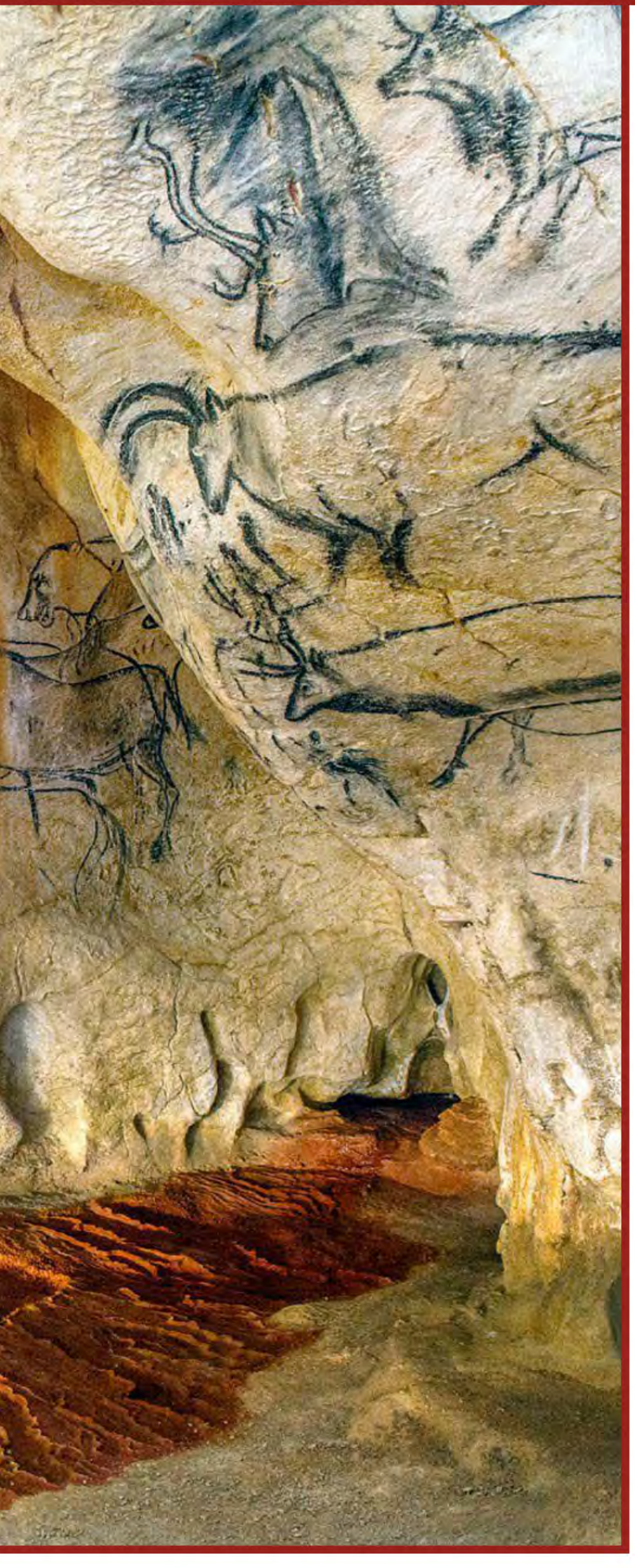
À la rencontre des premiers artistes

© SYCPA/SEBASTIEN GAYET

La réplique de la grotte Chauvet-Pont d'Arc va permettre au public de découvrir le bestiaire réalisé il y a 36 000 ans, sans risque pour la préservation de l'œuvre originale.

Dossier préparé par Luc Allemand
et Sophie Coisne

de l'humanité



C'est un événement dans le monde de la Préhistoire. Le 25 avril, la caverne du Pont d'Arc, plus grand fac-similé de grotte ornée au monde, a ouvert ses portes dans l'Ardèche. Construite à quelques kilomètres de l'original, elle restitue, sur plus de 3 500 m², les sols, les vestiges archéologiques et, surtout, les plus belles fresques de la grotte Chauvet. Des chefs-d'œuvre réalisés il y a 36 000 ans et qui, par leur modernité, ont obligé les préhistoriens à réviser leur conception de l'histoire de l'art. Des chefs-d'œuvre auxquels les chercheurs eux-mêmes n'ont plus qu'un accès très restreint. Ils nous expliquent ici ce que leur travail sur le fac-similé leur a appris de l'art de nos ancêtres.

1 La découverte qui a réécrit l'histoire de l'art
par Carole Fritz et Gilles Tosello

2 Dans l'atelier de la caverne du Pont d'Arc
par Carole Fritz et Gilles Tosello

1 • La découverte qui a réécrit l'histoire de l'art

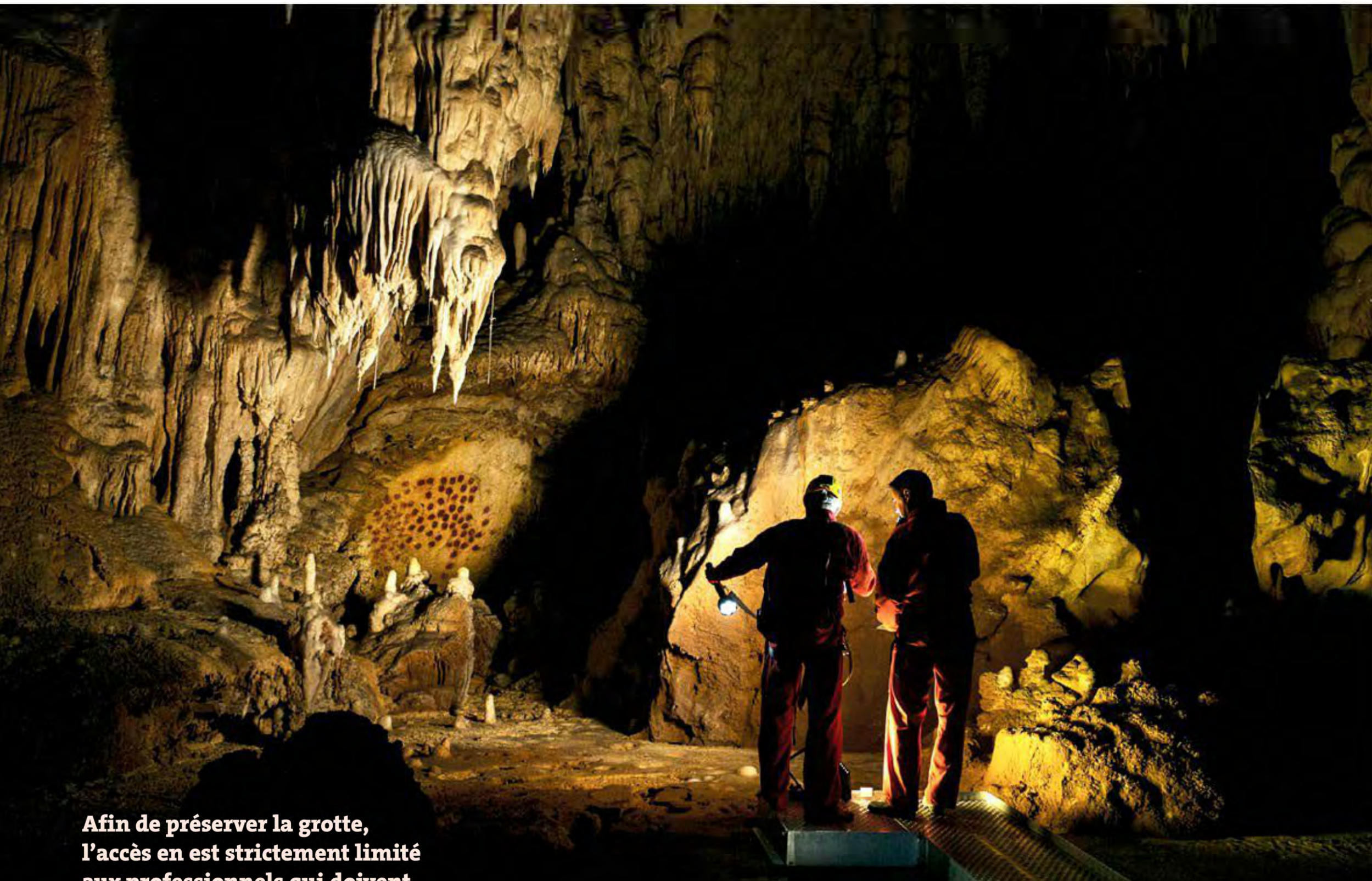
En étudiant la grotte Chauvet, les préhistoriens sont allés de surprise en surprise. Il ont en particulier constaté que l'art vieux de 36 000 ans était bien plus abouti que ce qui avait été imaginé pour l'époque.

La découverte de la grotte Chauvet-Pont d'Arc en 1994 marque un tournant majeur dans notre connaissance de la vie et de la spiritualité des hommes du Paléolithique. Cette cavité aux dimensions considérables (elle s'étend sur 9 hectares), à la topographie complexe, recèle, outre les restes d'ours des cavernes (ossements, empreintes, griffades, bauges...), d'abondants vestiges archéologiques (foyers, nappes de charbon, empreintes de pieds...). Surtout, ses parois sont ornées de centaines de motifs, signes et traces charbonneuses, et de plus de 420 représentations animales !

Un an plus tard, la publication par Jean Clottes et ses collaborateurs des premières datations au carbone-14 obtenues sur certains dessins noirs fait sensation. Elle révèle l'existence d'un art pariétal aurignacien* d'une splendeur inattendue, vieux de

***L'AURIGNACIEN** est une culture du Paléolithique supérieur (36 000 à 27 000 ans).

***LE MAGDALÉNIEN** est la dernière phase du Paléolithique supérieur (20 000 à 12 500 ans).



Afin de préserver la grotte, l'accès en est strictement limité aux professionnels qui doivent se déplacer exclusivement sur une passerelle métallique.

plus de 36 000 ans. Chez les scientifiques, ces dates sont accueillies avec enthousiasme par les uns et scepticisme par les autres. Il faut dire qu'elles bouleversent le modèle d'évolution linéaire de l'art et de la pensée symbolique chez les *Homo sapiens*, élaboré depuis un siècle en Europe.

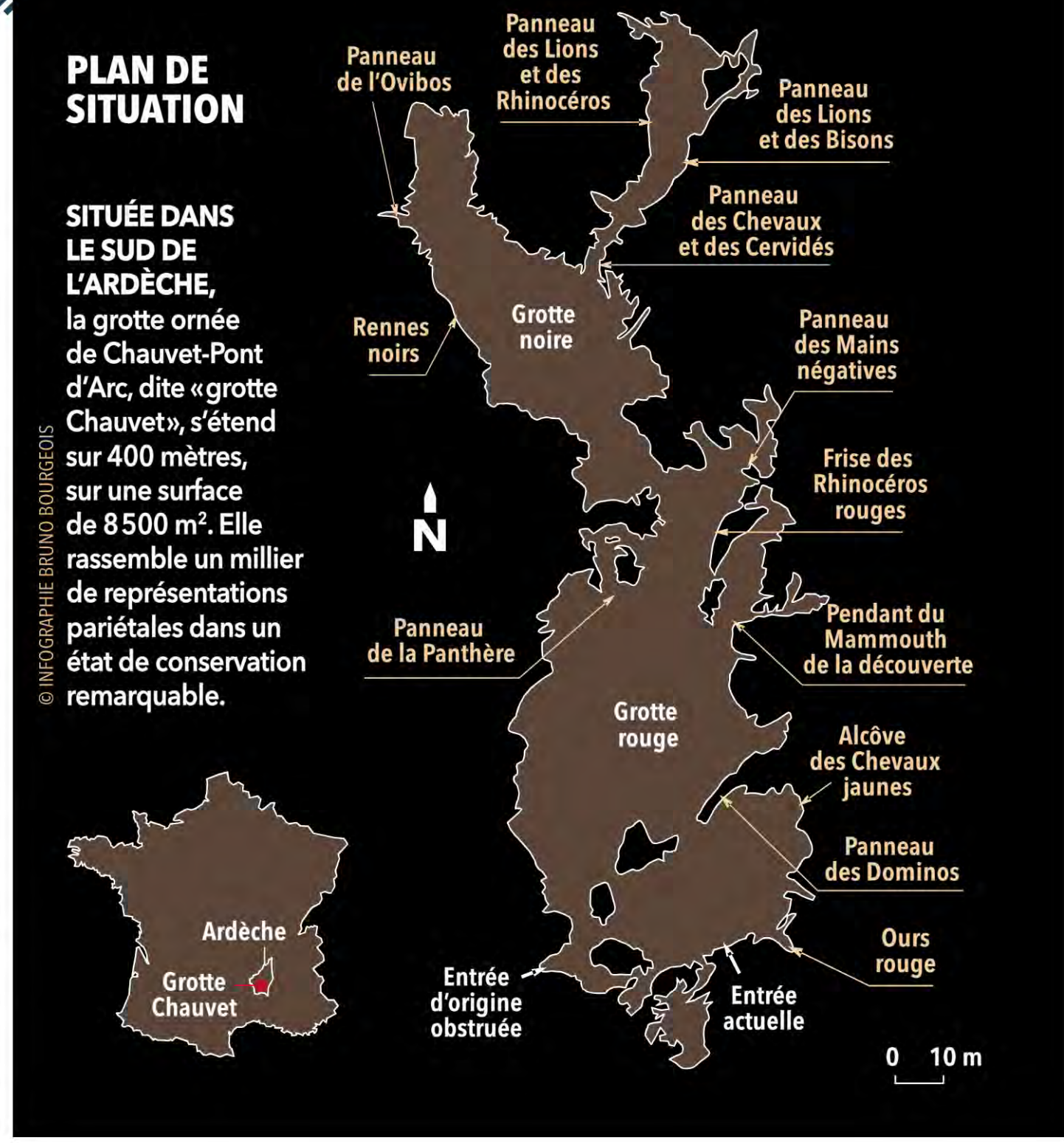
À l'époque, il est en effet admis – et enseigné – que l'art a évolué chez nos lointains ancêtres à la vitesse des progrès accomplis dans le domaine des techniques : il s'est amélioré lentement pendant trente millénaires, allant des balbutiements, à l'Aurignacien, à l'apogée et la pleine maîtrise au Magdalénien*. Le critère d'évaluation majeur est le réalisme anatomique de l'œuvre, autrement dit sa ressemblance avec le modèle vivant défini selon nos critères : proportions, présence de détails, perspective des membres, attitude... En se fondant sur de tels arguments, il est donc impossible aux préhistoriens d'imaginer qu'un cheval dessiné par un Aurignacien ait été aussi « bien fait » qu'un autre, daté du Magdalénien, vingt millénaires plus tard. La grotte Chauvet est opportunément venue faire voler ce modèle en éclats et ouvrir les yeux des préhistoriens : la notion de progrès dans l'art préhistorique – comme dans l'art tout court – n'existe pas, seules les techniques changent, ainsi que les sociétés dans lesquelles vivent les artistes.

Patrimoine fragile. À partir de 1998, une équipe pluridisciplinaire de recherche, dirigée d'abord par Jean Clottes puis par Jean-Michel Geneste, travaille sur ce site hors norme. L'abondance et la diversité des témoignages laissés par les hommes et la nature, doublées d'un parfait état de conservation (notamment pour les parois ornées), ouvrent d'exceptionnelles perspectives de recherche. De fait, la grotte Chauvet nous apparaît avec un état de fraîcheur dans lequel se trouvaient sans doute beaucoup d'autres cavités ornées dans le passé qui, trop tôt découvertes, ont été gravement endommagées. Dans les grottes de Lascaux (en Dordogne), de Niaux (dans l'Ariège) ou d'Altamira (en Espagne), certains éléments du contexte de l'art pariétal comme les sols archéologiques ont été détruits avant même leur étude approfondie. Un impératif s'impose immédiatement : il faut protéger ce patrimoine fragile. Et les exigences de conservation doivent avoir la priorité sur les objectifs du chercheur. Une passerelle métallique est alors installée pour se déplacer dans la grotte. Une passerelle que les chercheurs ne quittent que très exceptionnellement... ce qui limite les angles de vision sur les panneaux ornés ou les sols.

Heureusement, à partir de 2005, la technologie 3D permet de contourner ces contraintes. Des clones numériques de la grotte sont réalisés. Ce qui change considérablement les conditions et les techniques de son étude, que ce soit dans le domaine de la géomorphologie ou de l'art pariétal. Lorsqu'on se trouve sur la passerelle, par exemple, parfois à plusieurs mètres des parois, les figures situées en voûte ou sur des plans obliques, des creux ou des saillants, sont perçues avec un fort raccourci et sont donc très déformées. Dans ce cas, l'application de techniques issues de la photogrammétrie nous permet de générer des nuages de points 3D, puis des orthophotographies, utilisées comme support des relevés graphiques. >>>

PLAN DE SITUATION

SITUÉE DANS LE SUD DE L'ARDÈCHE, la grotte ornée de Chauvet-Pont d'Arc, dite « grotte Chauvet », s'étend sur 400 mètres, sur une surface de 8 500 m². Elle rassemble un millier de représentations pariétales dans un état de conservation remarquable.



© INFOGRAPHIE BRUNO BOURGEOIS

PAR **Carole Fritz,**
directrice du Centre de recherche et d'étude pour l'art préhistorique (Creap), à Toulouse.
carolefritz@me.com

ET **Gilles Tosello,**
préhistorien au Creap et plasticien.
gilles.tosello@wanadoo.fr

L'essentiel

- **DÉCOUVERTE EN 1994, la grotte Chauvet-Pont d'Arc a bouleversé la vision de l'art des préhistoriens.**
- **DEPUIS, on considère que la notion de progrès dans l'art préhistorique n'existe pas ; seules les techniques changent.**
- **LES FRESQUES ANIMÉES réalisées par les artistes forment un récit. C'est ce qui constitue l'originalité de la grotte.**

© SYCPA/SEBASTIEN GAYET

La découverte qui a réécrit l'histoire de l'art

»» Les problèmes de déformation optique des figures sont ainsi résolus. Membres de l'équipe depuis le début, nous vivons ces mutations successives, à travers les différents travaux que nous menons dans le secteur des Chevaux, dans la galerie des Panneaux rouges et dans celle du Cactus.

Grâce à l'étude approfondie des traces laissées sur les parois, nous tentons de retrouver les gestes des Aurignaciens puis leurs techniques (outils et pigments) et enfin les étapes successives de réalisation des figures. Nous enregistrons nos informations sur des « relevés graphiques » établis et contrôlés dans la grotte. À partir de cette base analytique solide, on peut aborder l'étude des assemblages et des compositions sur les panneaux ornés et, au-delà, entrevoir les motivations et les choix des artistes. La récurrence des faits observés permet de passer progressivement du niveau de l'individu à celui du groupe social et, au final, de formuler des hypothèses sur les messages portés et transmis par ces œuvres surgies de la nuit des temps, à la fois si lointaines et si proches de nous.

Gravures fines. Situé à plus de 190 mètres de l'entrée actuelle, le secteur des Chevaux est un des ensembles de figures noires les plus remarquables. Sur une dizaine de mètres linéaires, la paroi nord de la salle Hillaire regroupe 52 figures animales appartenant à 8 espèces. Cinq panneaux d'importance inégale s'articulent autour de deux niches assez profondes pour qu'un adulte s'y tienne debout. Les sols indurés nous ont permis d'approcher ces panneaux et de les analyser dans les meilleures conditions.

Le pigment noir qui a été utilisé par les artistes est constitué de charbon de bois appartenant à une seule espèce, le pin sylvestre. Le terme générique de « figures noires » englobe en fait une large diversité d'œuvres. Les techniques employées sont simples, mais leur combinaison peut aboutir à une chaîne gestuelle complexe, depuis le simple tracé au charbon, estompé ou non avec les doigts, jusqu'au mélange subtil d'argile résiduelle pour créer des nuances de gris, avec des ajouts en gravure au burin de silex pour préciser les contours ou insister sur des détails. L'exécution des figures noires repose avant tout sur un état d'esprit du peintre, qui se manifeste par un sens aigu de l'observation et d'adaptation au support rocheux. On pourrait dire que les propriétés spécifiques des parois ont stimulé l'imagination des artistes et fortement contribué à l'originalité de la grotte.

La galerie des Panneaux rouges est quant à elle située à une centaine de mètres de l'entrée paléolithique de la cavité, à l'extrémité nord de l'immense salle des Bauges. Le secteur se présente comme un fond de galerie sans issue. Il regroupe 63 animaux ou empreintes de mains et 37 signes et motifs, répartis sur 5 panneaux majeurs, séparés mais tous composés de peintures rouges (Lire « La peinture rouge, une technique élaborée », p. 31), ce qui renforce le sentiment d'unité symbolique du lieu.

Sur ce grand panneau, qui semblait *a priori* consacré aux seules peintures rouges, les séances de prises de vue nous ont conduits à faire la découverte inattendue de gravures fines. Ces incisions, qui n'apparaissent qu'en lumière frisante, ont été décelées sur l'écran de l'ordinateur car elles sont invisibles sur place en raison de leur finesse et de la distance d'observation ; elles viennent notamment souligner la toison peinte d'un rhinocéros à très longue corne. C'est la première fois que nous rencontrons dans la panoplie des artistes de Chauvet l'utilisation conjointe de gravure et de peinture rouge. Sur ce panneau, il existe aussi des figures entièrement gravées, comme le deuxième rhinocéros placé derrière le rouge.

En parcourant les panneaux ornés, certains groupes d'animaux accrochent le regard. Ici, des rhinocéros se battent, se flairent... Là, des cerfs se croisent et plus loin, des lions marchent côte à côte ou se montrent les dents. Chaque fois, ce qui retient l'attention, c'est la perception immédiate qu'une histoire est racontée, un moment saisi sur le vif et fixé sur la paroi, avec beaucoup de soin. C'est bien l'une des originalités de la grotte Chauvet, les récits s'étalent en fresques animées, dont le sens est plus ou moins intelligible pour nous.

Certains panneaux s'avèrent d'une complexité déconcertante. Au premier abord, on ne voit qu'une superposition d'animaux qui paraît aléa-

Vingt millénaires séparent ces deux représentations de chevaux. L'une, qui appartient à la grotte Chauvet, a 36 000 ans (à gauche), l'autre, qui provient de la grotte de Niaux, dans l'Ariège, 16 000 ans. Le réalisme du dessin le plus ancien est une révélation pour les préhistoriens. © CAROLE FRITZ ET GILLES TOSELLO

Dans la salle du Fond, sur un pendant rocheux tombant du plafond apparaît un bison à bras et jambes humains et bas de corps féminin. © JEAN CLOTTES/CNP

toire ou désorganisée. Les recherches sur le panneau des Chevaux nous ont montré une mise en place par espèce (rhinocéros, aurochs, cheval). Le groupe des chevaux, centre de la composition, a été exécuté en une dernière étape et l'emplacement leur avait été réservé. L'étude montre aussi une « anomalie » dans la chronologie : dans ses derniers gestes, l'artiste a retouché la corne d'un rhinocéros, l'une des premières figures réalisées dans la partie basse du panneau, le faisant repasser au premier plan, comme s'il se glissait sous le ventre du quatrième cheval. Cette modification graphique révèle le lien conceptuel qui unit les deux rhinocéros au groupe des quatre chevaux.

Vision du monde. La chasse des lions des cavernes a fortement marqué l'imagination des peintres de la grotte. Dans la salle du Fond, au centre du grand panneau des Lions, les félins regroupés sur la droite traquent en fixant du regard avec intensité une troupe de bisons qui s'enfuient. Quatre d'entre eux sont vus de face comme s'ils se tournaient vers le spectateur. À l'évidence, ce panneau doit être interprété comme une scène de chasse, avec une entrée des prédateurs par la droite et une fuite des proies vers la gauche.

En fait, cette scène fournit les clés d'interprétation pour d'autres compositions moins explicites sur le même thème. Dans la galerie des Panneaux rouges, sept félins s'en prennent à des rhinocéros, qui s'enfuient en deux groupes dans des directions opposées. La scène se lit de droite à gauche, comme dans la salle du Fond ; les félins rouges surtout exprimés par la tête sont peu détaillés et moins expressifs que leurs congénères dessinés en noir.

Les lions des cavernes, les plus grands prédateurs de l'époque, devaient être à la fois redoutés et admirés par les groupes humains qui fréquentaient les mêmes territoires. Il est plausible que ce double sentiment ait inspiré aux artistes chasseurs une certaine fascination et qu'ils se soient eux-mêmes mis en scène symboliquement, sous l'apparence des grands félins. Pourtant, la scène ne se limite pas à une chasse, cette mise à mort annoncée.

Sur le pendant de la Vénus, à droite de la fresque des Lions, les artistes ont placé une image féminine, centrée sur la fonction sexuelle et génitrice. Dès lors, les deux principes fondamentaux de la condition humaine, la vie et la mort, se trouvent à la fois assemblés en un même lieu, en une même action et placés en opposition, y compris dans l'espace. Une telle structuration, connue en ethnologie, nous renvoie à un discours dont la fonction finale est la médiation entre ces extrêmes, la résolution d'un conflit. Bien plus qu'un récit en images, les Aurignaciens nous livrent ici une vision du monde, l'histoire accède ainsi au statut de mythe.

On le voit, dès leur arrivée en Europe il y a près de 40 000 ans, les *Sapiens* avaient des capacités cognitives et un imaginaire qui leur ont permis une expression artistique parfaitement maîtrisée pour répondre à leurs besoins spirituels et sociaux. Pourtant, certains spécialistes refusent toujours d'admettre les dates de Chauvet, au seul prétexte que les dessins au fusain sont *« trop beaux »* ou *« trop bien faits »* pour être aurignaciens. Ils apparaissent ainsi comme les derniers partisans d'une vision obsolète et simpliste de l'art paléolithique. ■

La peinture rouge, une technique élaborée

Du point de vue technique, la peinture rouge demande à l'artiste plus de travail préparatoire que le dessin au charbon. Avant de commencer, il faut collecter le pigment, de l'hématite (sans doute sous forme de galets ou de plaquettes), la réduire en poudre et la mélanger avec de l'eau. Les modes d'application et la consistance du mélange varient selon le sujet choisi. Ils vont de l'empreinte de main enduite de peinture assez épaisse directement posée sur la paroi jusqu'au dessin au doigt ou au pinceau pour représenter les animaux, en passant par le souffler ou « crachis » (projection avec la bouche) du liquide coloré pour réaliser des silhouettes de mains (dites « négatives ») ou des points. Les contours de certains animaux rouges ont été estompés avec le bout des doigts, dans le même esprit que les figures noires au fusain.

© DRAC RHONES-ALPES/ MINISTÈRE DE LA CULTURE ET DE LA COMMUNICATION

2 • Dans l'atelier de la caverne du Pont d'Arc

Le 25 avril, la caverne du Pont d'Arc, réplique de la grotte Chauvet, a ouvert ses portes au public. Le préhistorien Gilles Tosello a réalisé une partie des panneaux et nous explique comment l'étude de la grotte avec Carole Fritz a nourri son travail de restitution.

PAR **Carole Fritz,** directrice du Centre de recherche et d'étude pour l'art préhistorique.

ET **Gilles Tosello,** préhistorien au Centre de recherche et d'études pour l'art préhistorique, et plasticien.

L'essentiel

> UNE RÉPLIQUE GRANDEUR NATURE de la grotte Chauvet-Pont d'Arc, baptisée la caverne du Pont d'Arc, a été réalisée à deux kilomètres de l'original.

> ELLE RESTITUE LES PEINTURES, DESSINS ET SCULPTURES les plus emblématiques de la grotte, ainsi que des éléments géologiques et archéologiques.

> LES DESSINS PRÉHISTORIQUES ont été reproduits avec des couleurs et des matériaux analogues à ceux utilisés par les artistes de la Préhistoire.

Dans son atelier, à Toulouse, Gilles Tosello contrôle la réalisation de sa copie du panneau des Lions grâce aux photographies réparties sur les murs. © CLICHÉ CAROLE FRITZ

La caverne du Pont d'Arc est à ce jour la plus grande réplique de grotte ornée paléolithique jamais réalisée. Elle restitue sur plus de 3 500 m² de surface au sol – l'équivalent d'un petit terrain de foot – 22 panneaux ornés, mais aussi des concrétions, des voûtes, les sols de la grotte et des vestiges archéologiques, avec l'exigence de reproduction la plus fidèle possible.

Deux ateliers ont réalisé les panneaux retenus pour cette réplique : celui d'Alain Dalis, à Montignac (Dordogne) et le mien, à Toulouse (Haute-Garonne). Mon atelier avait pour objectif de reproduire les deux fresques majeures ›››

››› de la grotte, dessinées au fusain de charbon de bois : le panneau des Chevaux, représentant 52 figures sur une surface de 45 m² et le panneau des Lions, 90 figures sur 65 m². Inutile de dire l'intimidation et le stress engendrés par cette perspective !

Modélisation 3D. La première étape ? Restituer les supports rocheux. Pour cela, nous avons eu recours aux techniques numériques les plus avancées. De fait, la grotte Chauvet a fait l'objet, entre 1997 et 2009, d'un enregistrement 3D par scanner laser, réalisé par le cabinet Perazio. Cette modélisation numérique globale a permis d'extraire les fichiers 3D correspondant aux différentes unités pariétales.

À partir de ces fichiers, une machine numérique a taillé des blocs de mousse de haute densité, de manière à obtenir une ébauche des reliefs rocheux. Ils ont ensuite été moulés. Des coques en résine armée de fibre de verre ont été fabriquées puis la surface des panneaux a été entièrement modelée à la main en résine acrylique, afin

La copie de la fresque des Lions reproduit sur 3,5 mètres sur 12 la cavalcade des lions, chevaux, rhinocéros, bisons, mammouths... Les dessins ont été réalisés au fusain de charbon de bois fabriqué à partir de pin sylvestre.

© CLICHÉ CAROLE FRITZ

Les supports rocheux, comme ici celui du grand panneau des Lions, ont été réalisés en résine à partir d'un modèle numérique. Leur surface a été ensuite modelée à la main avec du mortier et du ciment afin de reproduire chaque détail des parois.

© CLICHÉ CAROLE FRITZ

de reproduire au plus près les détails des parois originales. Dans le cas de Chauvet, ce modelage très précis était fondamental, car les différents états de surface du calcaire participent à la genèse des peintures, notamment des figures noires. L'étape la plus importante, celle des peintures, pouvait alors commencer.

Mêmes matériaux. Dès le début du projet, il a été décidé, en accord avec ses commanditaires, que la réplique des œuvres devait avant tout traduire l'esprit des originaux, quitte à sacrifier une illusoire précision millimétrique. L'idée était de tenter de transmettre au futur visiteur une part d'émotion tout en restant fidèle au travail des artistes aurignaciens (chasseurs-collecteurs ayant vécu il y a environ 35 000 ans). Dans l'atelier, les dessins ont été reproduits avec des couleurs et des matériaux analogues à ceux employés par les artistes de la Préhistoire. En effet, seul l'usage du charbon de bois permet de retrouver à la fois la fragilité et ›››

> Grotte Chauvet • 2

© SYCPA/ SEBASTIEN GAYET

La concrétion du mammouth (ci-dessus) a été réalisée à Paris, avant d'être installée sur place. Ci-contre, le secteur des Chevaux, posé et fixé à la voûte sur le chantier de la réplique en mars 2014, est en attente de la réalisation des sols.

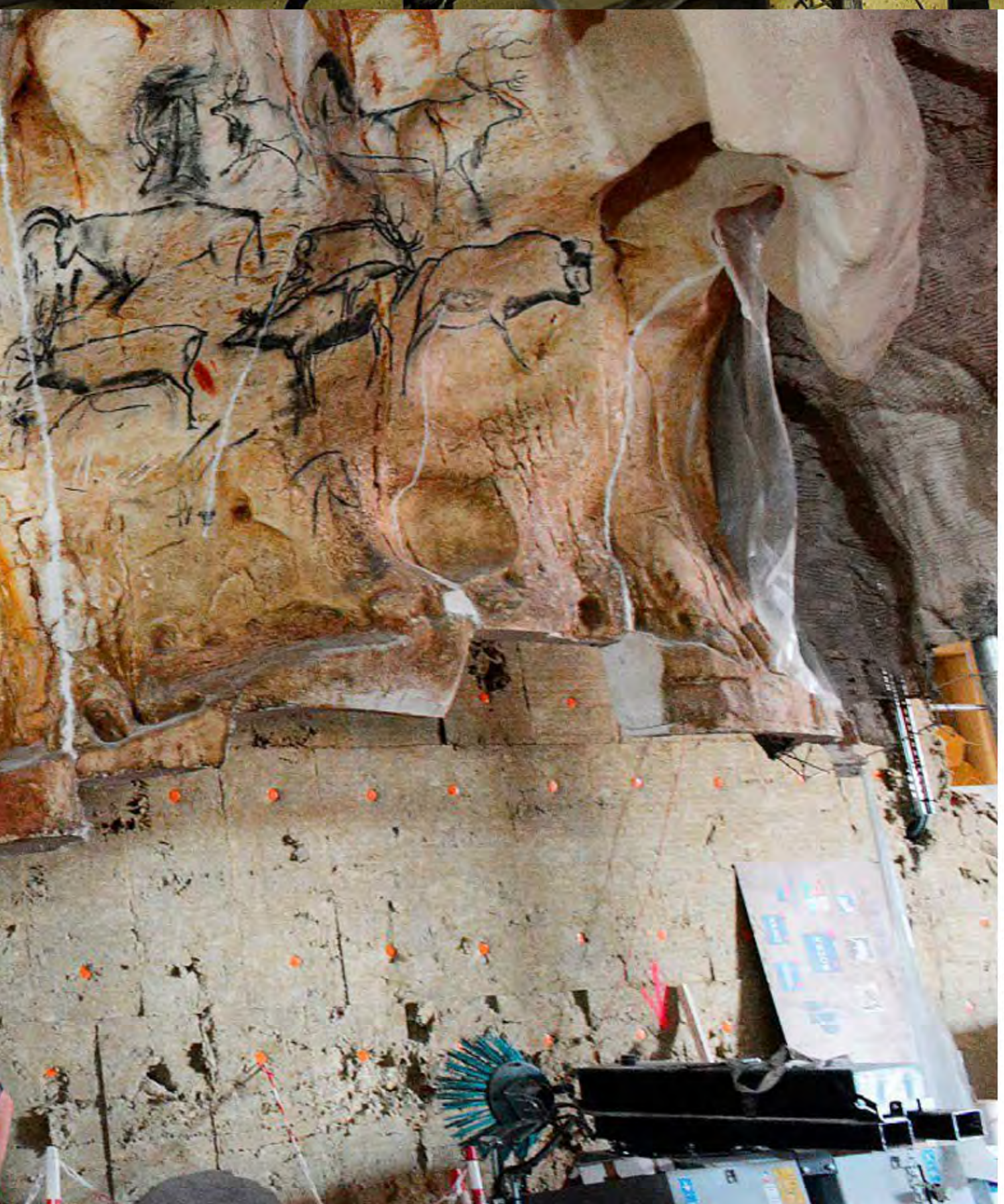
»» la puissance des courbes qui composent les figures animales dessinées au fusain et à l'estompe.

En réalisant la réplique de la grotte Chauvet, nous avons valorisé les données acquises depuis 1998, tout au long de nos recherches dans la grotte originale. Notre connaissance approfondie du panneau des Chevaux, étudié entre 2000 et 2006, a été très précieuse : nous savions à l'avance combien les compositions comptaient de figures, quelle était la chronologie de leur réalisation, où se trouvaient les rares tracés rouges. Ce qui nous a permis d'anticiper les difficultés, comme les effacements ou reprises de tracés, qui n'ont pas manqué de se produire lors du travail en atelier.

En revanche, pour le panneau des Lions, seuls des travaux thématiques ou ponctuels ont été publiés mais aucune étude d'ensemble n'a encore été entreprise dans le cadre de l'équipe scientifique. Bien sûr,

Tous les reliefs de la grotte ont été relevés en 3D, ce qui permet la reconstitution au millimètre près, à l'échelle 1.

© CHRISTOPHE LEPETIT/ ONLY FRANCE



© CLICHÉ CAROLE FRITZ

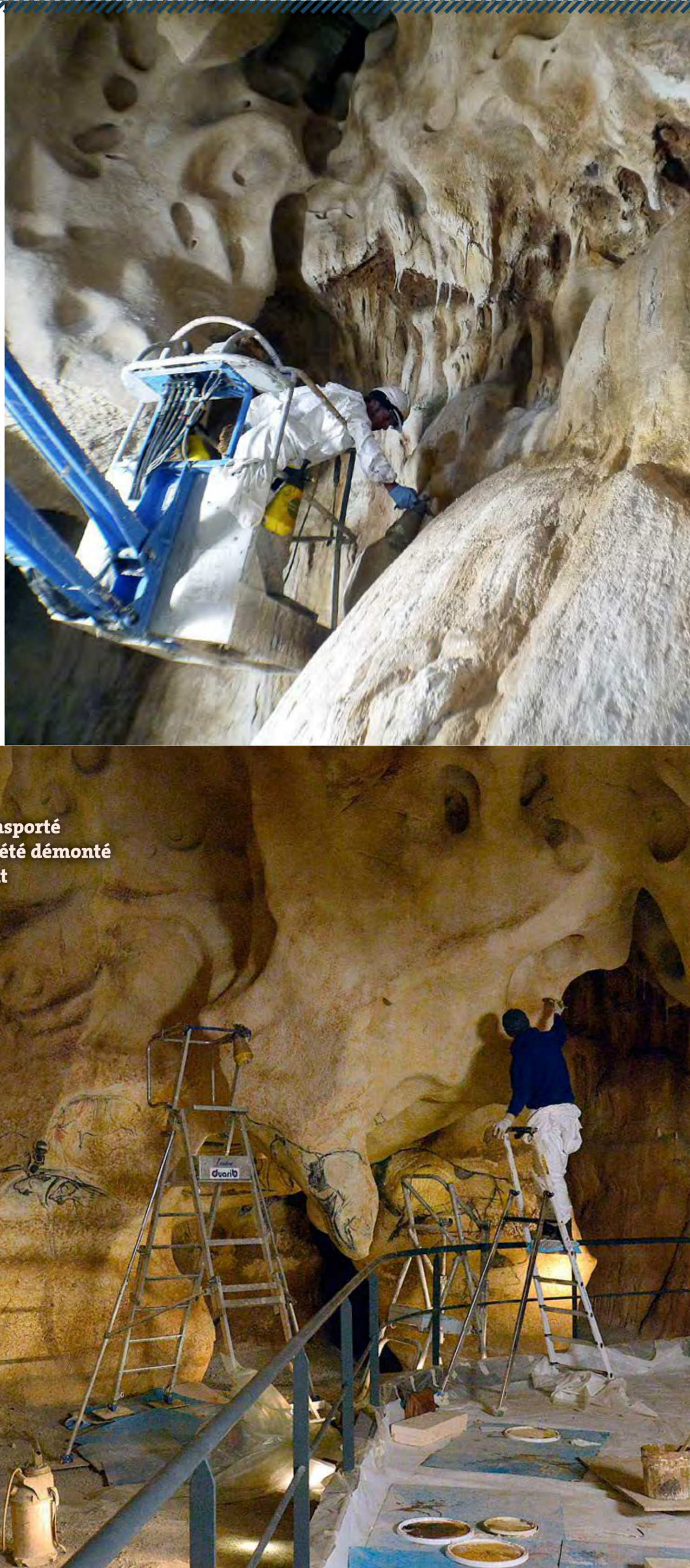
l'observation des photographies de ce panneau nous a permis de reconnaître l'essentiel des sujets, de voir bien des détails. Mais l'expérience nous a appris que, derrière ces évidences, se dissimule une grande complexité, due aux superpositions, aux ajouts et aux réutilisations partielles de figures antérieures. Sans parler des repentirs, appuis de doigts, grattages ou essuyages qui emplissent cet art aurignacien d'une énergie encore perceptible aujourd'hui.

Ordre originel. Ayant fait ce constat, la méthodologie que nous avons définie pour le fac-similé s'est apparentée à celle d'une étude classique… avec beaucoup moins de temps pour la mener à bien ! Avant le premier coup de pinceau, nous avons commencé par dépouiller minutieusement la documentation photographique, agrandissant à l'écran les clichés pour démêler les superpositions, les séquences gestuelles… figure par figure, panneau par panneau. Ce qui nous a conduits à prendre des notes, à dessiner des schémas interprétatifs de déchiffrement et de chronologie, devenus des fils conducteurs lors de la phase de travail en atelier. ›››

> Grotte Chauvet • 2

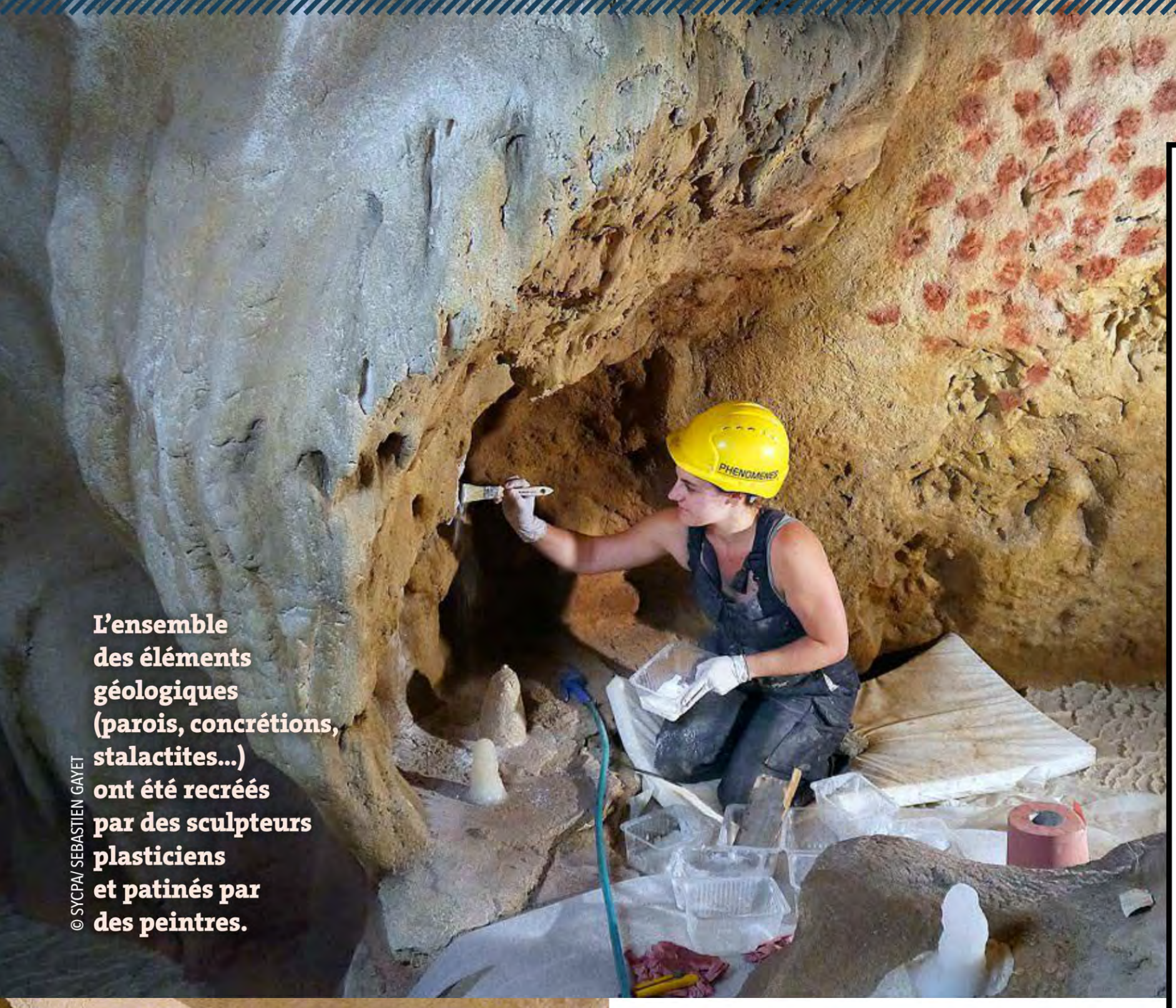
»» En effet, nous avons choisi de réaliser les fac-similés dans l'ordre chronologique d'exécution des compositions originales (établi sur la base des photographies), en tentant de suivre au plus près les séquences gestuelles de l'artiste préhistorique, ou de s'en approcher le plus possible. Dans les cas fréquents de superpositions multiples, qui créent des surfaces peintes très confuses, cette solution présente l'avantage d'ajouter les figures de manière rationnelle, selon un déroulement qui respecte l'ordre originel, quitte à recouvrir les premières. Ainsi, sur le côté gauche du panneau des Lions, nous avons d'abord restitué les peintures rouges très érodées, mais qui se distinguent encore, avant de les recouvrir par les griffades d'ours puis les figures noires qui les masquent aujourd'hui en grande partie.

Gestes retrouvés. Cependant, si la recherche a logiquement nourri le fac-similé, l'observation systématique de



© SYCPA/ SEBASTIEN GAYET

Trop volumineux et trop lourd pour être transporté d'un seul bloc, le grand panneau des Lions a été démonté avant d'être intégré dans son environnement définitif en février dernier.



L'ensemble des éléments géologiques (parois, concrétions, stalactites…) ont été recréés par des sculpteurs plasticiens et patinés par des peintres.

© SYCPA/ SEBASTIEN GAYET

© CLICHÉ CAROLE FRITZ

la documentation photographique collectée dans la grotte originale pour les besoins de la réplique nous a fait découvrir de nouvelles figures, ce qui ne doit pas trop étonner en l'absence d'étude préalable de ce secteur.

Voir apparaître peu à peu les peintures dans l'atelier a aussi suggéré des interrogations. Ainsi, il semble bien que le groupe de félins emblématiques de la grotte, qui regardent tous vers la gauche, ait été exécuté dans le sens inverse, le dernier lion se trouvant en haut à droite au bord de l'arête rocheuse. La première surprise passée, nous avons compris que ce déroulement du travail s'expliquait par le fait qu'une seule main avait réalisé la scène. Or, pour l'artiste, dès lors que le projet est bien défini, le sens d'exécution devient secondaire.

Enfin et surtout, ce travail de fac-similé a été une opportunité unique d'observer, grandeur nature, la genèse des dessins, geste après geste. Cette expérience personnelle, subjective mais très enrichissante, reste la plus intense. Quel chercheur ne rêve pas de faire revivre l'objet de son étude ? ■

Pour en savoir plus

Livres

> Pedro Lima, *Chauvet-Pont d'Arc, le premier chef-d'œuvre de l'humanité révélé par la 3D,* Synops, 2014.

> Dominique Baffier, *La grotte Chauvet,* Éditions Ouest-France, 2014.

> Jean Clottes, *La Grotte Chauvet : L'Art des origines,* Seuil, 2010.

> Marcel Otte, *Les Aurignaciens,* Éditions Errance, 2010.

La Recherche a publié

> Bérénice Robert, « Neandertal aussi était un artiste », janvier 2015, p. 56.

> Lise Loumé, « L'espace de restitution de la grotte Chauvet », janvier 2014, p. 97.

> Nicolas Chevassus-au-Louis, « L'étude de l'art permet d'approcher la pensée des hommes du Paléolithique », février 2012, p. 72.

> Nicolas Constans, « Grotte Chauvet : la fin de la polémique ? », juillet-août 2012, p. 8.

Sur le Web

> **lacavernedupontdarc.org** Le site de la caverne du Pont d'Arc, projet visant à reproduire une réplique de la grotte ouverte aux visiteurs.

> **tinyurl.com/culture-gouv-chauvet** Le dossier du ministère de la Culture sur la grotte Chauvet.

> **http://tinyurl.com/unesco-chauvet** La page du site de l'Unesco consacrée à la grotte Chauvet et à sa conservation.

> **http://tinyurl.com/lascaux-art** Sur le site de la grotte de Lascaux, la chronologie de l'art pariétal.

Forum

> La conférence « Le passé recomposé » au Forum science recherche et société, le 28 mai, au Cnam (Paris) www.forum-srs.com.

sophia boutique

Une sélection unique
de produits
et services culturels

Découvrez notre choix de livres à offrir ou à vous offrir.

Jeux mathématiques et énigmes policière

Qu'apportent les mathématiques à la progression rigoureuse des enquêtes policières ? Des articles scientifiques tentent d'y répondre. Ils alternent avec des énigmes policières que vous serez amenés à résoudre avec pour seule arme votre ingéniosité.

Réf. LR09 5,50€

Jeux mathématiques Spécial jeux de cartes, poker, magie

Mathématiques et jeux de cartes, c'est un mariage naturel. Les mathématiques ont aussi un rôle fondamental dans nombre de tours de magie utilisant des cartes. En suivant les conseils donnés dans ces pages, vous en comprendrez les ressorts et éblouirez vos amis.

Réf. LR10 5,50€

Jeux mathématiques Spécial élections

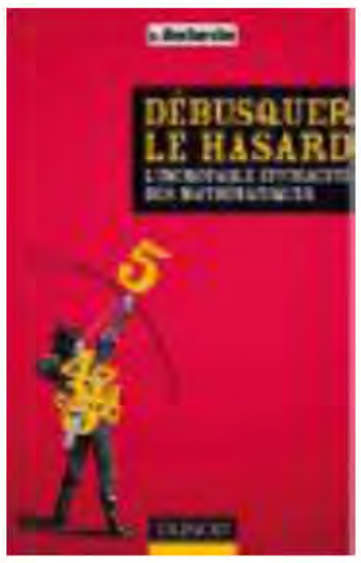
Les sondages, les stratégies de votes, le découpage électoral n'auront bientôt plus de secrets pour vous. Plaisir de jouer, plaisir de comprendre, vivez un agréable divertissement avec les mathématiques électorales.

Réf. LR11 5,50€

Jeux - Testez votre intelligence

Dans ce numéro exceptionnel, les plus grands spécialistes des neurosciences font le point sur les dernières avancées, quitte à bousculer bien des idées reçues. Quant aux meilleurs créateurs de jeux, ils mettent en application sur près de 40 pages, toutes les facettes du jeu d'intelligence.

Réf. LR12 5,50€



Débusquer le hasard

Compilation d'articles parus dans La Recherche, cet ouvrage décrit 32 situations où mathématiques rime avec efficacité.

Réf. LR05 16,00€
- 5% soit **15,20€**

Les grandes controverses scientifiques

Ce livre raconte douze controverses qui ont accompagné les grandes découvertes scientifiques.

Réf. LR06 14,50€
- 5% soit **13,78€**

Dossiers Santé

100 idées reçues sur la santé dont il faut se méfier

Dans ce numéro spécial : des informations et conseils sur ce qui vous intéresse au plus haut point, votre santé.

Réf. LR07 5,90€

Le cœur

La Recherche et ses partenaires de la presse quotidienne régionale et de Belgique vous présentent ce « Dossier Santé » où l'information claire et accessible est validée par des spécialistes.

Réf. LR08 4,90€

@chetez 7 jours/7 sur sophiaboutique.fr

Votre commande atteint 49€ FRAIS DE PORT OFFERTS

Entrez la référence du produit (inscrite à côté de chaque article) dans le moteur de recherche et achetez en quelques clics.

Livraison à domicile rapide
NOUVEAU ! livraison en Point Relais

Paiement sécurisé

Satisfait ou remboursé

100% des articles en stock

La Recherche votre magazine favori vous ouvre ses archives...

LE MAGAZINE
6,40€ le numéro

Année 2013

N° 475 mai 2013
Dossier : Voyage dans le futur.

N° 476 juin 2013
Dossier : Perturbateurs endocriniens. Comment ils menacent notre santé.

N° 477 juillet-août 2013
SPÉCIAL : Cerveau. Comment notre cerveau perçoit le monde ?

N° 478 août 2013
SPÉCIAL : 500 ans de controverses scientifiques.

N° 479 septembre 2013
Dossier : Energie noire. Pourquoi l'Univers accélère.

N° 480 octobre 2013
Dossier : Comment naissent les espèces.

N° 481 novembre 2013
Dossier : La science de Stephen Hawking.

N° 482 décembre 2013
Dossier : Big Data. Traitement massif des données.

Année 2014

N°483 janvier 2014
SPÉCIAL : Le top des 10 découvertes de l'année

N°484 février 2014
Entretien : Peter Higgs

N°485 mars 2014
Dossier : ordinateur quantique. Les physiciens testent les premières machines.

N°486 avril 2014
Dossier : Le génie d'Alexandre Grothendieck.

N°487 mai 2014
Dossier : T-Rex. Enquête sur la star des dinosaures.

N°488 juin 2014
Dossier : Bitcoin, la monnaie devient numérique.

N°489 juillet-août 2014
SPECIAL : La réalité n'existe pas.

N°490 août 2014
La bibliothèque idéale : les 40 livres de science indispensables.

N°491 septembre 2014
Dossier : Qui sont vraiment nos ancêtres ?

N°492 octobre 2014
Dossier : Incertitude quantique. La fin du principe d'Heisenberg ?

N°493 novembre 2014
Dossier : Comment savons-nous que nous sommes morts ?

N°494 décembre 2014
Dossier : Maths, les femmes prennent-elles le pouvoir ?

Année 2015

N°495 janvier 2015
Dossier : Les 10 découvertes les plus importantes de l'année.

N°496 février 2015
Dossier : L'origine de l'univers dévoilée.

N°497 mars 2015
Dossier : Stress, comment il modifie notre cerveau.

N°498 avril 2015
Dossier : Intelligence artificielle, jusqu'où iront les réseaux sociaux.

LES DOSSIERS DE LA RECHERCHE
6,90€ le numéro

Année 2012
RD47 : Les énergies de demain
RD48 : Dieu et la science
RD49 : La mémoire
RD50 : Les plus belles énigmes de la science
RD51 : Les pôles, enjeu planétaire
SP01 : La naissance

Année 2013
SP02 : Les origines de la vie
SP03 : Les abysses
SP04 : Les particules élémentaires
SP05 : Jeux de mathématiques et de physique
SP06 : Addictions
SP07 : L'album de l'année 2013

Année 2014 NOUVELLE FORMULE
SP08 : L'intelligence artificielle
SP09 : Les nouvelles dimensions du son
SP10 : Piloter la machine par la pensée
SP11 : Internet, pour le meilleur et pour le pire
SP12 : La télévision du futur
SP13 : Comment les robots perçoivent le monde

Et pour conserver votre collection précieusement

➲ **l'écrin 12 numéros**

18€ seulement

(hors frais de port)

Bon de commande

À retourner sous enveloppe affranchie à LA RECHERCHE
BP 65 - 24 chemin Latéral - 45390 Puiseaux - ✆ 33 (0) 2 38 33 42 89 - nchevallier.s@orange.fr

V499

J'indique mes coordonnées :

Nom : Prénom :

Adresse :

Code postal : Ville : Pays :

E-mail :

Pour un meilleur suivi de votre commande et pour profiter de nos offres exclusives, merci de nous indiquer votre e-mail.

Oui, je souhaite recevoir dans les 10 jours la commande ci-dessous

Indiquez ci-dessous les numéros souhaités	Quantité	Prix unitaire TTC	TOTAL TTC
■ LA RECHERCHE - préciser le/les numéro(s) **6,40€**	____	6,40 €	____ €
■ LES DOSSIERS DE LA RECHERCHE - préciser la/les référence(s) commençant par RD et SP **6,90€**	____	6,90€	____
■ L'écrin LA RECHERCHE 12 numéros **18€**	____	18,00 €	____ €
FRAIS DE PORT : France métropolitaine (Étranger, nous contacter) **1,50€ le** numéro / **+ 0,50€** le numéro supplémentaire	____		____ €
6,85€ l'écrin / **8,35€** de 2 à 3 / **9,10€** de 4 à 5 Au-delà de 5 écrins, nous contacter.	____		____ €
Total de ma commande (Frais de port inclus)	____		____ €

Je règle aujourd'hui par :

❒ chèque à l'ordre de *SOPHIA PUBLICATIONS* ❒ carte bancaire

N° ____ ____ ____ ____

Je note aussi les 3 derniers chiffres du numéro inscrit au dos de ma carte bancaire, au niveau de la signature : ____ Expire fin : ____

Signature obligatoire :

Votre commande sera expédiée à réception de votre règlement.

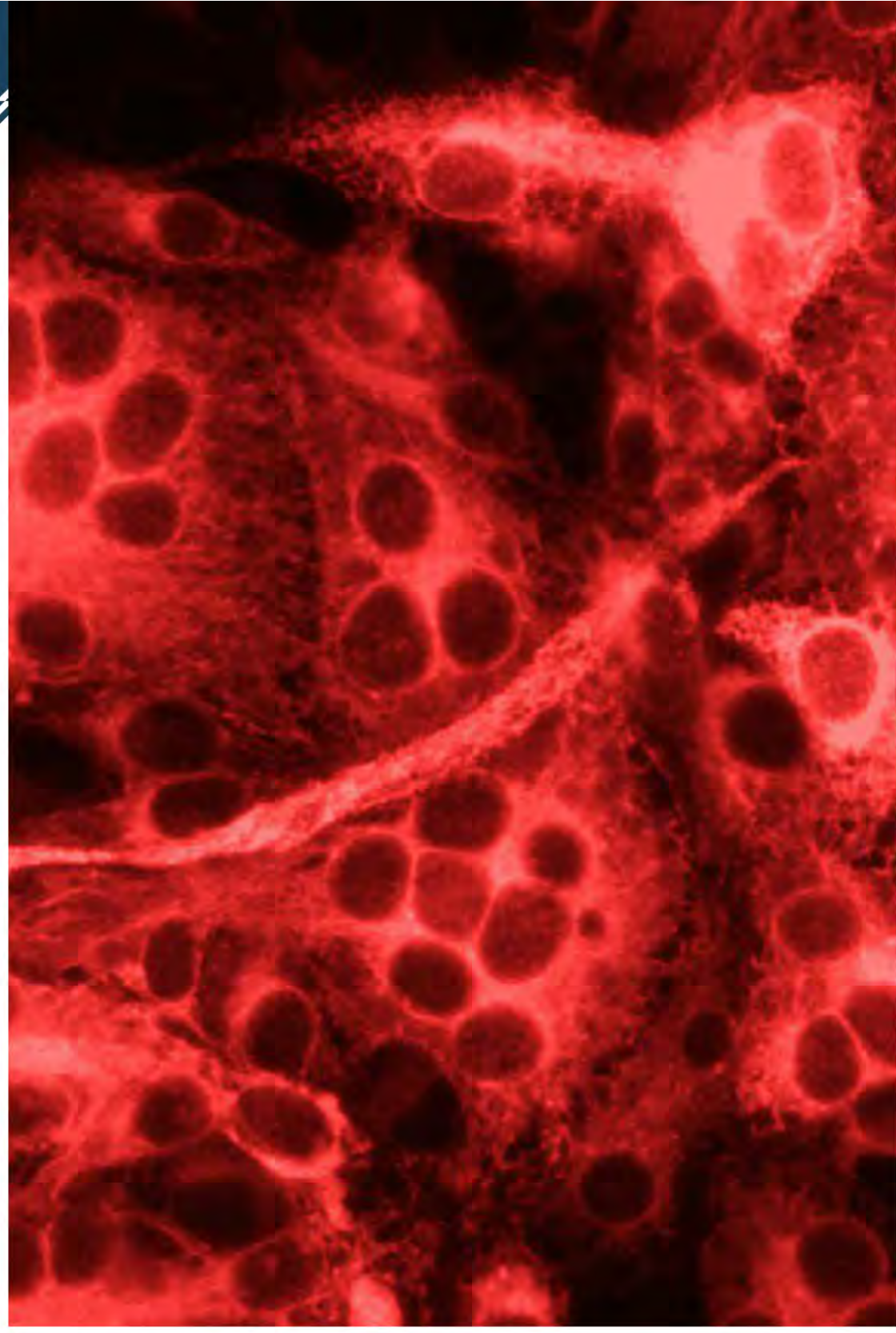
Loi informatique et libertés : vous disposez d'un droit d'accès et de rectification des données vous concernant. Elles pourront être cédées à des organismes extérieurs sauf si vous cochez la case ci-contre ☐

Cancérologie

Des virus tueurs de tumeur

Lutter contre le cancer avec des virus ? Le concept est ancien mais il revient en force après avoir été sérieusement dépoussiéré grâce à la génomique et à la biologie moléculaire. Plusieurs essais chez des malades atteints de tumeurs résistantes sont en cours.

PAR **Mathias Germain,**
journaliste.



© UNITÉ DE GÉNOMIQUE VIRALE ET VACCINATION/ INSTITUT PASTEUR

L'essentiel

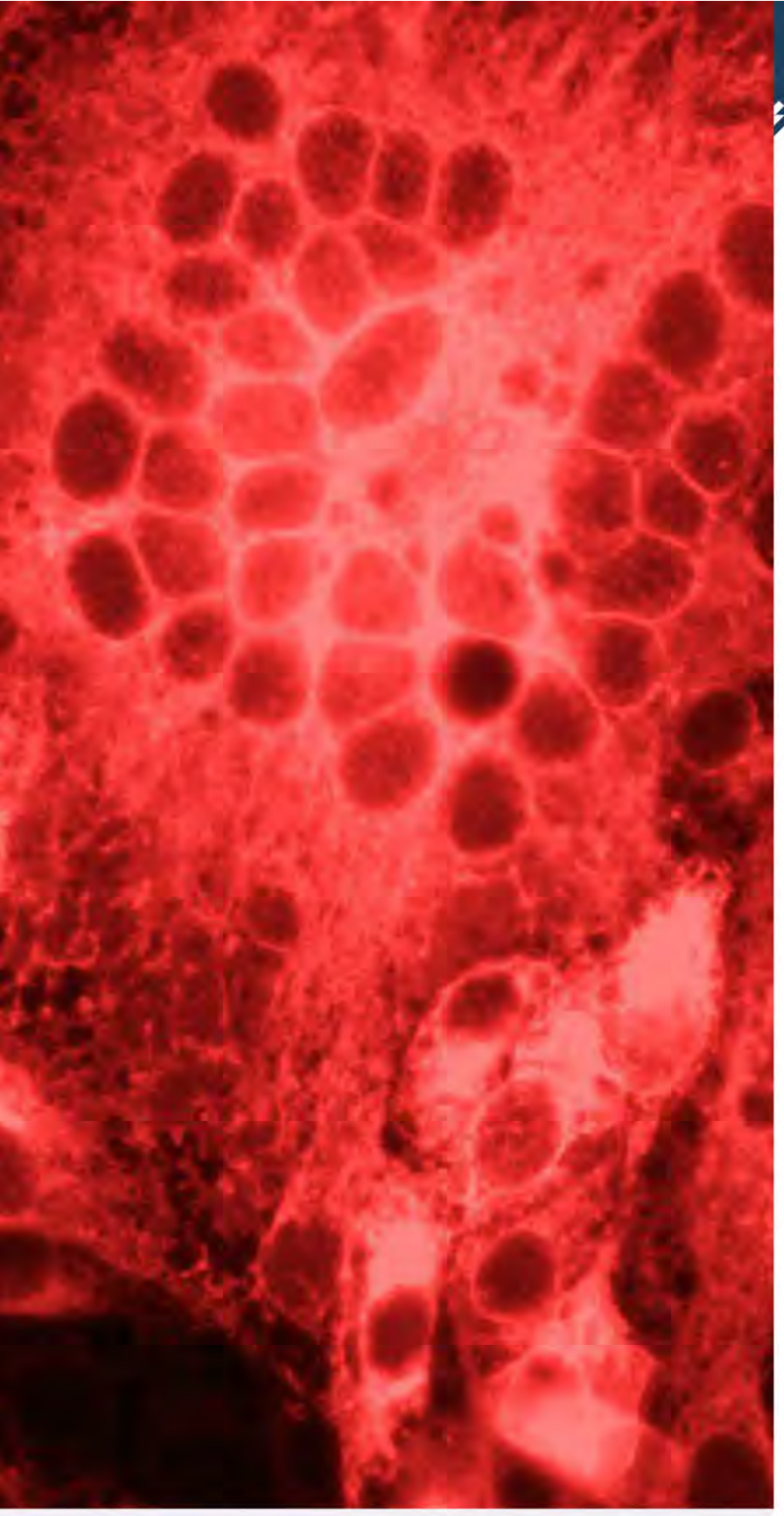
- **LES VIRUS peuvent avoir un double effet : détruire des cellules cancéreuses et relancer le système immunitaire.**
- ***IN VITRO,* les virus de la rougeole détruisent en 72 heures près de 100 % des cellules cancéreuses en culture.**
- **COMPARÉE À LA CHIMIOTHÉRAPIE répétée, l'utilisation des virus du vaccin de la rougeole a très peu d'effets secondaires.**

Stacy Erholtz est une miraculée. Cette Américaine de 49 ans se bat depuis dix ans contre le « myélome multiple ». Ce cancer du sang touche une variété de globules blancs, les plasmocytes, des cellules du système immunitaire qui sont produites par la moelle osseuse. Les plasmocytes malades prolifèrent, forment des tumeurs dans les os et déstabilisent les défenses de l'organisme. Ce cancer particulièrement agressif est souvent résistant aux traitements. C'est le cas pour Stacy. Malgré plusieurs chimiothérapies et deux transplantations de cellules souches de moelle osseuse, la maladie reprend le dessus à chaque fois.

Les tumeurs se disséminent sur son front, son sternum, les clavicules, la colonne vertébrale… lorsqu'elle entend parler en 2012 des travaux conduits par Stephen Russell, hématologue à la Mayo Clinic de Rochester, aux États-Unis. Ce spécialiste des cancers du sang travaille depuis plusieurs années sur un traitement à base de virus atténués* de la rougeole. Des virus qui servent habituellement à la vaccination. En 2013, son équipe est prête à lancer une première expérimentation chez l'homme. Décidée à lutter jusqu'au bout, Stacy se porte volontaire. Et, au mois de juin de cette année-là, elle est l'une des deux premières malades à tester le traitement.

Injection à haute dose. Installée dans le service d'hématologie, Stacy reçoit en moins d'une heure plus de 100 milliards de virus atténués par perfusion, une dose suffisante pour vacciner dix millions de personnes. Un choc pour l'organisme ! Rapidement, sa température franchit le seuil des 40 °C. Pendant près de quatre heures, Stacy vomit, tremble et souffre d'un terrible mal de tête. Elle passe ensuite plusieurs jours clouée au lit avant que la douleur ne s'atténue. Pendant les semaines qui suivent, elle reste sous surveillance médicale. Comme de l'iodure de sodium a été préalablement incorporé dans les virus, ceux-ci sont visibles par scintigraphie, une technique d'imagerie médicale. Ainsi, les médecins peuvent observer leur progression dans les tumeurs

* **UN VIRUS ATTÉNUÉ** est un virus vivant qui a perdu une part de son pouvoir pathogène.



Des virus vaccinaux de la rougeole (en rouge) ont infecté des cellules cancéreuses humaines. Cela a provoqué leur fusion et le rassemblement de leurs noyaux, ultime étape avant leur mort.

de Stacy. Plusieurs jours après l'intraveineuse, ils constatent que toutes les tumeurs sont détruites [1]. Aucun autre effet secondaire n'est à déplorer. Stacy Erholtz semble en rémission complète.

Que s'est-il passé dans ses tumeurs ? L'explication tient en une formule : CD46. CD46 est le nom d'un récepteur, une protéine implantée dans la membrane des cellules humaines. Ce récepteur permet à la cellule d'inhiber le système immunitaire dit « inné » : il évite qu'elle fasse l'objet d'une attaque accidentelle des molécules qui veillent à la sécurité de notre organisme. Le problème est que cette propriété est détournée par certaines cellules cancéreuses. Celles-ci présentent 100 à 1 000 fois plus de récepteurs CD46 que les cellules saines, ce qui leur permet de rester invisibles pour les défenses de l'organisme, et de proliférer en toute tranquillité.

Mais les progrès de la biologie moléculaire ont permis à l'équipe de la Mayo Clinic de découvrir que le récepteur CD46 est aussi, pour les virus de la rougeole, et plus spécifiquement pour les virus atténués utilisés dans le cadre de la vaccination, une porte d'entrée dans une cellule. Une protéine du virus, la protéine H, interagit avec le récepteur CD46 et permet l'infection de la cellule. Ce qui faisait la force des cellules cancéreuses devient leur point faible. Les cellules cancéreuses ont beaucoup plus de portes d'entrée pour le virus atténué de la rougeole que les cellules saines.

Une fois à l'intérieur de la cellule tumorale, le virus de la rougeole fait naturellement ce qu'il sait faire : se servir des protéines et des organes de la cellule pour se répliquer. Cette action provoque la mort de la cellule cancéreuse, pendant que les répliques du virus vont infecter les cellules cancéreuses contiguës... L'infection se propage ainsi au sein de la tumeur, mais très peu vers les cellules saines. Faut-il beaucoup de virus pour détruire une tumeur ? On considère qu'il faut une particule virale par cellule tumorale. Donc, si on estime que les tumeurs représentent dix milliards de cellules, on injecte une dose équivalente de virus.

Le recours à ces virus présente un deuxième avantage : il réactive le système immunitaire contre les tumeurs résistantes. Plus précisément, la destruction de cellules cancéreuses par »»

CINQ DATES CLÉS

1949
Aux États-Unis, Alice Moore teste *in vitro* et *in vivo* les effets du virus responsable de « l'encéphalite à tiques » sur des souris atteintes de tumeurs cancéreuses.

1952
Aux États-Unis, Chester Southam transpose les travaux d'Alice Moore à l'homme en utilisant le virus West Niles. Les effets secondaires sont trop violents.

1981
Premier séquençage complet d'un virus, celui de la polio.

2005
L'agence chinoise du médicament est la première à approuver l'utilisation de virus contre le cancer pour des essais. Il s'agit d'un virus de la grippe, un adénovirus modifié appelé Oncorine®.

2014
Trois essais cliniques de phase 3 sont en cours. Ils testent l'efficacité de l'adénovirus modifié Oncorine®, d'un virus de l'herpès modifié OncoVex® et d'un réovirus modifié Reolysin®.

© PIERRE CORDELIER/ INSERM

Le virus de l'herpès a l'avantage de provoquer très rapidement la mort des cellules tumorales, comme le montre cette expérience d'inoculation du virus de l'herpès HSV1 sur des cultures cellulaires cancéreuses humaines.

Des virus tueurs de tumeur

>>> les virus relance les mécanismes de défense dits « adaptatifs », ceux qui, après la reconnaissance d'un agent pathogène, sont capables d'apporter une réponse spécifique. En effet, lorsque la membrane de la cellule cancéreuse est en cours de destruction, des signaux moléculaires sont largués dans l'organisme. Ces signaux sont alors détectés et intégrés par les cellules sentinelles du système immunitaire, les cellules dendritiques. Ces dernières transmettent ces signaux moléculaires à des cellules immunitaires naïves, des lymphocytes T. activées. Celles-ci deviennent alors des cellules tueuses spécifiquement adaptées contre les cellules cancéreuses, car elles possèdent les récepteurs capables de les reconnaître. Au final, les cellules cancéreuses sont les cibles exclusives de deux adversaires, les virus de la rougeole et les lymphocytes T [Fig.1].

Dans le cas de Stacy Erholtz, la stratégie s'est révélée payante. Les plasmocytes cancérigènes sont détruits. Totalement ? Manifestement non : neuf mois après ce traitement massif, une tumeur s'est formée au niveau du front. Heureusement, elle disparaît grâce à la radiothérapie. Aux dernières nouvelles, Stacy Erholtz est en rémission, et elle mène campagne pour lever des fonds afin d'accélérer le développement de ce traitement encore expérimental.

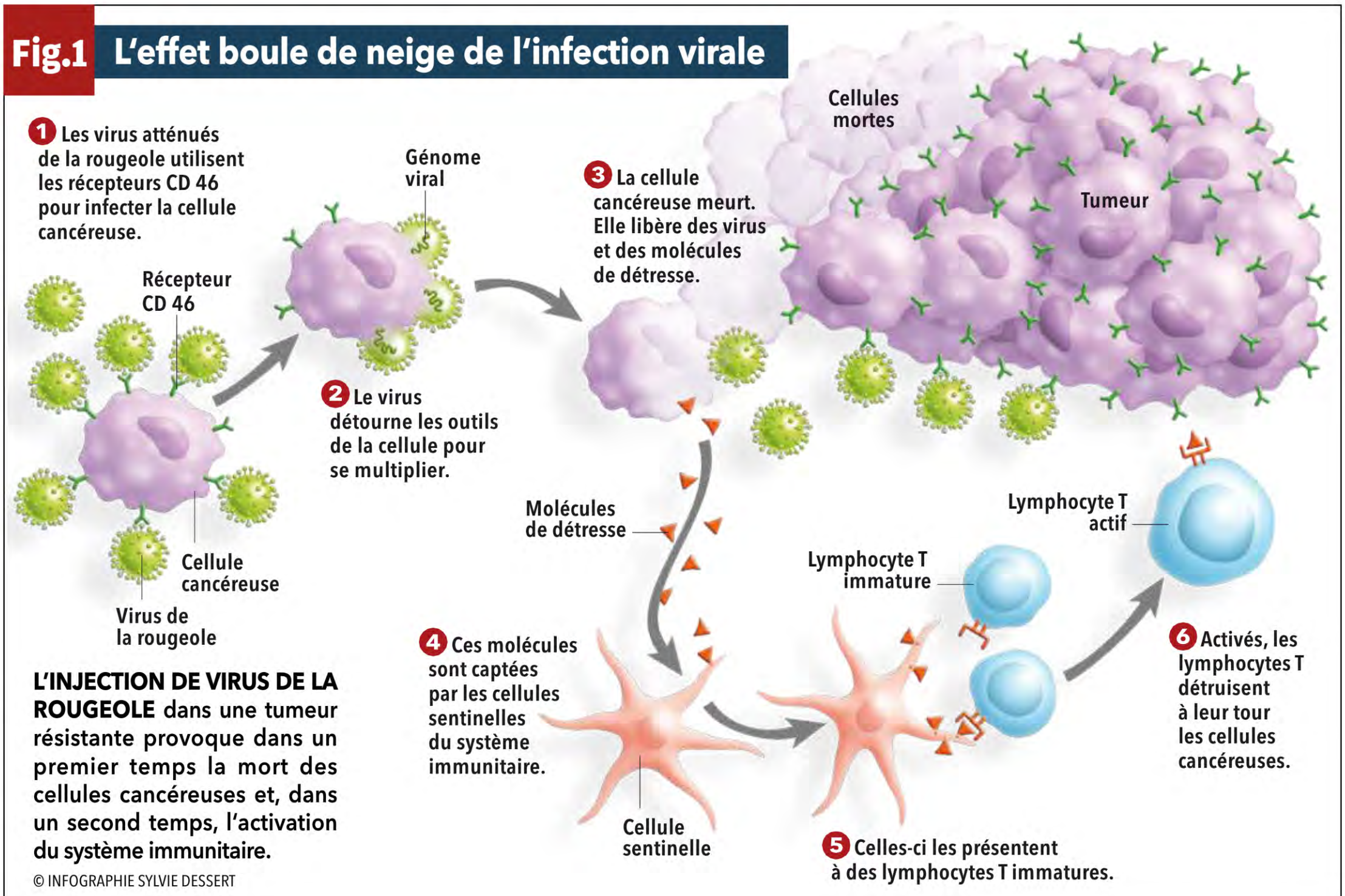
L'aubaine de la vaccination. Utiliser des virus de la rougeole pour tuer des cellules cancéreuses ? Le concept peut surprendre. D'autant que certains cancers sont initiés par des virus : les papillomavirus sont responsables des cancers du col de l'utérus, les virus de l'hépatite C et B de certains cancers du foie. Aujourd'hui, les cancérologues estiment que 15 % des cancers sont déclenchés par des virus. *« Cependant, l'idée d'utiliser des virus est ancienne »*, rappelle Frédéric Tangy, virologue à l'Institut Pasteur.

Depuis une dizaine d'années, ce dernier travaille sur ce concept avec Marc Grégoire, cancérologue à l'université de Nantes. Des médecins ont décrit dans les années 1970 des régressions de lymphomes spontanées chez des jeunes qui ont une rougeole [2]. Mais cette méthode a connu un tournant décisif quand il a été découvert que le virus atténué avait la capacité d'utiliser les récepteurs CD46. Coïncidence heureuse, c'est le développement de la vaccination (dans les années 1960) qui a donné cette propriété aux virus de la rougeole.

En effet, au départ, le virus sauvage de la rougeole a pour cible naturelle les lymphocytes. Pour les infecter, il se sert d'un récepteur baptisé SLAM. C'est grâce à la mise en culture des virus (dans des

© DR JEAN RIGGOTT/ MAYO CLINIC

Fig.1 L'effet boule de neige de l'infection virale



L'INJECTION DE VIRUS DE LA ROUGEOLE dans une tumeur résistante provoque dans un premier temps la mort des cellules cancéreuses et, dans un second temps, l'activation du système immunitaire.

© INFOGRAPHIE SYLVIE DESSERT

Stacy Erholtz, atteinte d'un myélome multiple, est l'une des deux premières patientes à avoir testé, avec succès, le traitement mis au point par Stephen Russell.

cellules d'embryon de poulet) pour les rendre, dans un objectif de vaccination, moins virulents, qu'ils ont acquis la capacité d'utiliser les récepteurs CD46. *« C'est une véritable aubaine. Nous avons ainsi à notre disposition un outil qui a fait ses preuves en termes de sécurité,* souligne Frédéric Tangy. *Et comparée à la chimiothérapie répétée, les virus du vaccin de la rougeole n'ont pratiquement pas d'effets secondaires. En outre, ils sont entièrement éliminés par l'organisme après la destruction des tumeurs. »*

Cependant, cette stratégie soulève une question. Avant le traitement, Stacy Erholtz n'était pas vaccinée contre la rougeole. Au moment de la perfusion, son système immunitaire y était donc exposé pour la première fois. Cette stratégie reste-t-elle efficace chez des personnes vaccinées ? *« Oui,* répond Frédéric Tangy, *car la vaccination empêche les dégâts induits par le virus, mais ne le neutralise pas directement. Donc le fait d'avoir été immunisé contre la rougeole ne bloquera pas l'activité du virus. Surtout si on injecte les virus à proximité des tumeurs. »*

Convaincu de cette stratégie, il s'apprête à lancer, avec Marc Grégoire, un essai clinique chez des personnes atteintes d'un mésothéliome pleural malin, un cancer très résistant induit par l'exposition à l'amiante. *« Nous utilisons une souche* différente du virus de la rougeole que celle de la Mayo Clinic,* explique Marc Grégoire. *C'est la souche Schwartz, qui entre dans la composition des vaccins en Europe. Et les résultats sont tout aussi encourageants.* In vitro, *30 % des cellules cancéreuses en culture sont détruites en 24 heures, 100 % en 72 heures* [3]. *Cela dit, dans une tumeur cancéreuse* in vivo, *la population de cellules n'est pas homogène, il faut s'attendre à ce que certaines soient résistantes, c'est là que la réactivation du système immunitaire est intéressante. »* Mais Marc Grégoire et Frédéric Tangy ont aussi apporté des modifications à leur virus atténué de la rougeole. *« Normalement, pour avoir le temps de se multiplier dans la cellule, le virus stoppe les mécanismes suicidaires de son hôte, la maintenant en vie pendant deux ou trois jours,* explique Frédéric Tangy. *Nous avons donc enlevé le gène qui confère cette propriété au virus. De cette façon, le virus induit plus vite la mort de la cellule. »*

Modifications génétiques. Marc Grégoire et Frédéric Tangy ne sont pas les seuls à modifier les virus pour les rendre plus efficaces ou plus spécifiques à certaines tumeurs résistantes. Toute la recherche actuelle dans ce domaine tourne autour de ce concept. Une équipe du Centre de recherche en cancérologie de Toulouse a récemment démontré l'efficacité d'un virus de l'herpès contre des cellules du cancer du pancréas [4]. *« Ce virus n'est pas spécifique au pancréas,* explique Pierre Cordelier, responsable des recherches. *Il peut être utilisé dans le gliome, le glioblastome, le mélanome. Mais dans les tumeurs du pancréas, il existe un environnement moléculaire particulièrement propice à sa réplication. »*

Une bonne nouvelle car ces cancers sont très résistants aux traitements. *« Les cellules cancéreuses pancréatiques s'adaptent aux traitements et modifient considérablement leur métabolisme cellulaire*,* explique Pierre Cordelier. *Mais ce qui fait leur force contre la chimiothérapie peut devenir leur talon d'Achille pour les virus de l'herpès. En effet, les mécanismes de chimiorésistance* >>>

***UNE SOUCHE DE VIRUS** est une sous-catégorie dans une même famille de virus.

* **LE MÉTABOLISME CELLULAIRE** est l'ensemble des mécanismes chimiques qui permettent sa croissance et sa multiplication.

Alice Moore, pionnière de la virothérapie

Dans les années 1950, alors que la chimiothérapie et la radiothérapie n'en sont qu'à leurs débuts, Alice Moore, virologue à l'Institut Sloan Kettering à New York, est l'une des premières à infecter des cellules cancéreuses *in vitro* et *in vivo* chez des animaux. Elle montre méthodiquement que le virus responsable de « l'encéphalite à tiques », surtout répandu en Russie et en Europe de l'Est, peut détruire des tumeurs cancéreuses chez la souris [1]. Pour lancer ses recherches, Alice Moore s'est appuyée sur des constats médicaux. En effet, dès le début du XX^e^ siècle, des médecins rapportent de courtes rémissions consécutives à des infections par la varicelle ou la grippe, chez des personnes souffrant de leucémies. D'autres à la suite d'hépatites. En 1949, des médecins de l'université de l'État d'Ohio contaminent une vingtaine de malades avec des virus de l'hépatite en espérant les soigner de la maladie de Hodgkin, un cancer des ganglions lymphatiques. Ils constatent une amélioration chez sept d'entre eux.
La démonstration faite chez l'animal par Alice Moore est moins empirique. Ses résultats impressionnent son chef de service, Chester Southam, qui souhaite faire des essais chez l'homme. Mais, comme le virus de l'encéphalite est très virulent, il choisit le virus West Niles qui semble provoquer des fièvres peu brutales dans les populations endémiques. Il l'injecte auprès d'une trentaine de personnes ayant des cancers très avancés, et sans option thérapeutique. Malheureusement, il n'avait pas prévu que le virus allait se révéler très virulent chez ces New-Yorkais, jamais exposés à ce virus. Résultat, la grande majorité d'entre eux ont eu de fortes fièvres et des malaises. Deux sont décédés. Et seulement quatre ont vu leur tumeur régresser de façon transitoire.

[1] A. Moore, *Cancer, 2,* 525, 1949.

Des virus tueurs de tumeur

››› *sont aussi très bénéfiques pour la propagation de ce virus.* »

Comment cela fonctionne-t-il ? Pour cette expérience, le virus de l'herpès a été génétiquement modifié. Par mesure de sécurité, les chercheurs ont retiré certains gènes responsables de sa virulence. Parmi eux, ont été supprimés les gènes qui codent une enzyme, la ribonucléotide réductase, nécessaire à sa réplication. Ainsi, ces virus ne pourront proliférer que dans des cellules présentant une forte activité de protéines de la même famille. C'est le cas des cellules cancéreuses pancréatiques qui, pour résister à la chimiothérapie, surexpriment les ribonucléotides reductases 1 et 2, deux protéines humaines « cousines » de la protéine virale.

Autre modification importante dans les premières générations de ces virus, l'ablation de la protéine virale 34.5, essentielle pour « parasiter » la cellule hôte et favoriser la réplication. Ces virus ont été testés *in vivo* ; leur sécurité a été démontrée, mais leur efficacité était plus discutable. Pour ces raisons, les chercheurs ont décidé de réintroduire la protéine 34.5, mais en contrôlant son expression par des molécules spécifiques des cellules cancéreuses pancréatiques. Résultat, ces virus gagnent en agressivité contre les tumeurs, tout en épargnant les cellules saines. « In vitro, *les cellules sont tuées dans un délai très court, entre trois et six jours,* constate Pierre Cordelier. In vivo, *chez les souris, les tumeurs sont considérablement réduites au bout de quinze jours. L'avantage avec le virus de l'herpès, c'est qu'il a un cycle viral rapide, beaucoup plus rapide que le virus de la grippe, qui a aussi été testé contre le cancer du pancréas.* »

Essai clinique. Ces travaux de Pierre Cordelier, menés avec la société Karcinolys, qui détient les brevets de ce virus, devraient aboutir au lancement d'un essai clinique d'ici à un an ou deux. « *Notre travail préclinique a démontré l'intérêt thérapeutique de combiner l'utilisation du virus et de la chimiothérapie de référence, avec lesquels nous avons obtenu des résultats spectaculaires. Nous essayons désormais de déterminer quelle est la meilleure séquence de traitement afin d'obtenir un effet optimal.* »

En outre, son équipe continue encore de décrypter les mécanismes moléculaires qui induisent la mort cellulaire. « *C'est un domaine passionnant !* » s'enthousiasme Pierre Cordelier, qui n'a que très rarement constaté d'effets aussi encourageants depuis une dizaine d'années de recherche en cancérologie. « *C'est amusant de voir qu'un vieux concept, soupçonné au début du XX^e siècle, et testé scientifiquement dans les années 1950* [lire « Alice Moore, pionnière de la virothérapie », p. 45], *a été totalement dépoussiéré ces vingt dernières années grâce à la génomique et aux connaissances de la biologie moléculaire. Ce qui est aussi positif avec l'utilisation des virus, c'est que la recherche se recentre sur la cellule cancéreuse, son mode de fonctionnement, pour une approche plus rationnelle de la prise en charge de la maladie.* »

À travers le monde, une vingtaine d'équipes travaille sur l'utilisation des virus en cancérologie. Les virus de la rougeole, de l'herpès mais également les adénovirus, les parvovirus (lire « Les parvovirus particulièrement attirés par les cellules cancéreuses », p. 47), et le virus du sida (« Le virus du sida utilisé pour rééduquer le système immunitaire », ci-dessous), sont l'objet de toutes les attentions des chercheurs qui les rendent plus spécifiques. Si cela continue, ces virus initialement pathogènes pourraient devenir les meilleurs alliés des malades. Ils le sont déjà pour les chercheurs. ■

Le virus du sida utilisé pour rééduquer le système immunitaire

Les virus sont utilisés comme des agents antitumeurs, mais ils peuvent aussi servir à rééduquer des cellules immunitaires, comme les lymphocytes T. L'idée est de transférer un gène, par l'intermédiaire d'un virus du sida inactivé, dans un lymphocyte pour qu'il devienne actif contre des cellules cancéreuses spécifiques. Cette technique de thérapie génique a été testée par Carl June, de l'hôpital pour enfants de Philadelphie, aux États-Unis, qui l'a expérimentée en 2011 sur trois patients atteints de leucémie chronique [1]. Comment a-t-il fait ? Il a prélevé près d'un milliard de lymphocytes T du malade, puis il les a mis en contact avec des virus du sida inactivés. Ces virus ont été modifiés afin de porter un gène qui code un récepteur capable de reconnaître une protéine spécifiquement présente à la surface des lymphocytes T. Ces virus, naturellement habiles à pénétrer les cellules du système immunitaire comme les lymphocytes T, intègrent le gène dans ces cellules. Les lymphocytes deviennent alors capables de cibler des lymphocytes B devenus cancéreux. Réinjectés au malade, ils peuvent les combattre efficacement, tout en relançant l'ensemble du système immunitaire. Dans cette stratégie, les virus inactivés n'ont aucun contact direct avec le malade. Ils servent seulement de vecteurs pour former des cellules.

[1] D. L. Porter *et al., NEJM, 365,* 725, 2011.

[1] S.J. Russell *et al., Mayo Clinic Proceedings, 89,* 926, 2014.
[2] G. Pasquinucci *et al., Lancet, 1,* 136, 1971.
[3] J.-B. Guillerme *et al., Cancer Research, 19,* 1147, 2013.
[4] M. Gayral *et al., Human Gene Therapy, 25,* 1, 2015.

Pour en savoir plus

- E. Kelly et S. J. Russell, *Molecular Therapy, 15,* 651, 2007. S. J. Russel dresse un panorama des débuts de la virothérapie.
- Frank Ryan, *Virus et Hommes, un destin commun ?,* Le Pommier, 2011.
- Erle S. Robertson, *Cancer Associated Viruses,* Springer, 2012.
- **http://ovcboston.com** Le site de la 9e Conférence internationale sur les virus oncolytiques, du 13 au 16 juin 2015, à Boston, aux États-Unis.
- **http://www.mayo.edu** Le site de la Mayo Clinic, l'établissement où a eu lieu le traitement de Stacy Herholz.

Les parvovirus particulièrement attirés par les cellules cancéreuses

C´EST UNE ÉTONNANTE DÉCOUVERTE. Personne ne s'attendait à ce que des virus s'épanouissent dans des cellules cancéreuses. Dans les années soixante, les chercheurs ont découvert les parvovirus dans des tumeurs humaines transplantées chez des animaux de laboratoire. Au départ, ils ont pensé que ces virus étaient la cause des tumeurs. Ensuite, ils se sont rendu compte que les animaux étaient les porteurs, sans symptôme clinique, des parvovirus, et que les tumeurs transplantées étaient rapidement infectées, puis plus ou moins détruites par ces virus.

À la suite de ces observations, nous avons mené des travaux spécifiques. Nous avons alors démontré in vivo que la présence de parvovirus dans les tumeurs est pleinement opportuniste. Les parvovirus s'installent là parce qu'ils y sont bien pour se multiplier. Ils sont capables de pénétrer n'importe quelle cellule, mais les cellules tumorales sont leurs cibles. Par exemple, lorsque ces virus sont placés en présence de deux cultures de cellules, dont l'une est en voie de cancérisation, ils se répliquent dans les cellules cancéreuses et épargnent les cellules saines.

© DKFZ, HEIDELBERG

Jean Rommelaere
virologue
• travaille au Centre allemand de recherche sur le cancer, à Heidelberg
• réalise le premier essai clinique pour traiter des tumeurs cérébrales avec des parvovirus
• étudie les parvovirus oncolytiques

CETTE SÉLECTIVITÉ S´EXPLIQUE AINSI. À la surface des cellules cancéreuses, il n'existe pas de récepteurs spécifiques qui permettent aux virus de les infecter. En fait, la composition interne de la cellule cancéreuse les attire. En effet, la cellule cancéreuse produit des facteurs associés au processus de cancérisation, qui sont nécessaires aux virus pour se répliquer efficacement. En outre, au contraire de la cellule saine, elle ne produit plus certains facteurs qui s'opposent à la réplication des virus. Résultat, le virus se réplique en plus grande quantité et produit beaucoup plus de protéines responsables de la mort cellulaire.

Un autre mécanisme rend très efficace les parvovirus contre les cellules cancéreuses : les protéines des parvovirus responsables de la mort cellulaire sont rendues encore plus agressives par des enzymes activées lors du métabolisme propre aux cellules cancéreuses. Donc, pour un même taux de production de produits viraux, l'effet toxique est beaucoup plus élevé dans des cellules cancéreuses que dans des cellules normales.

NOS TRAVAUX ONT AUSSI permis de constater que le parvovirus induit différentes morts cellulaires. Il peut ainsi contourner des mécanismes de résistance de mort cellulaire, que l'on retrouve souvent, par exemple en chimiothérapie.

Les parvovirus, comme les autres virus oncolytiques [1], déclenchent un deuxième effet très intéressant. Les morts cellulaires qu'ils induisent activent une réponse spécifique du système immunitaire contre les cellules cancéreuses. Les espoirs fondés sur la virothérapie reposent sur ces deux aspects, la multiplicité des morts cellulaires qui permet de cibler puis de tuer des cellules qui résistent à des traitements classiques, et d'activer le système immunitaire.

Avec les parvovirus, un essai clinique est en cours en Allemagne depuis 2011 chez une vingtaine de personnes atteintes de tumeurs récurrentes au cerveau. Les premières données obtenues sont encourageantes. Un autre essai chez des malades atteints d'un cancer du pancréas devrait être lancé.

Ce premier essai chez l'homme a été réalisé avec des parvovirus à l'état naturel, mais nous avons travaillé à une deuxième génération de virus, chez qui les capacités d'oncolyse ont été augmentées. Nous avons aussi réfléchi à combiner la virothérapie avec des chimiothérapies. Cela offre des synergies impressionnantes qui permettent de réduire de cent fois la dose de virus. De nombreuses perspectives s'ouvrent avec ces recherches sur la virothérapie. »

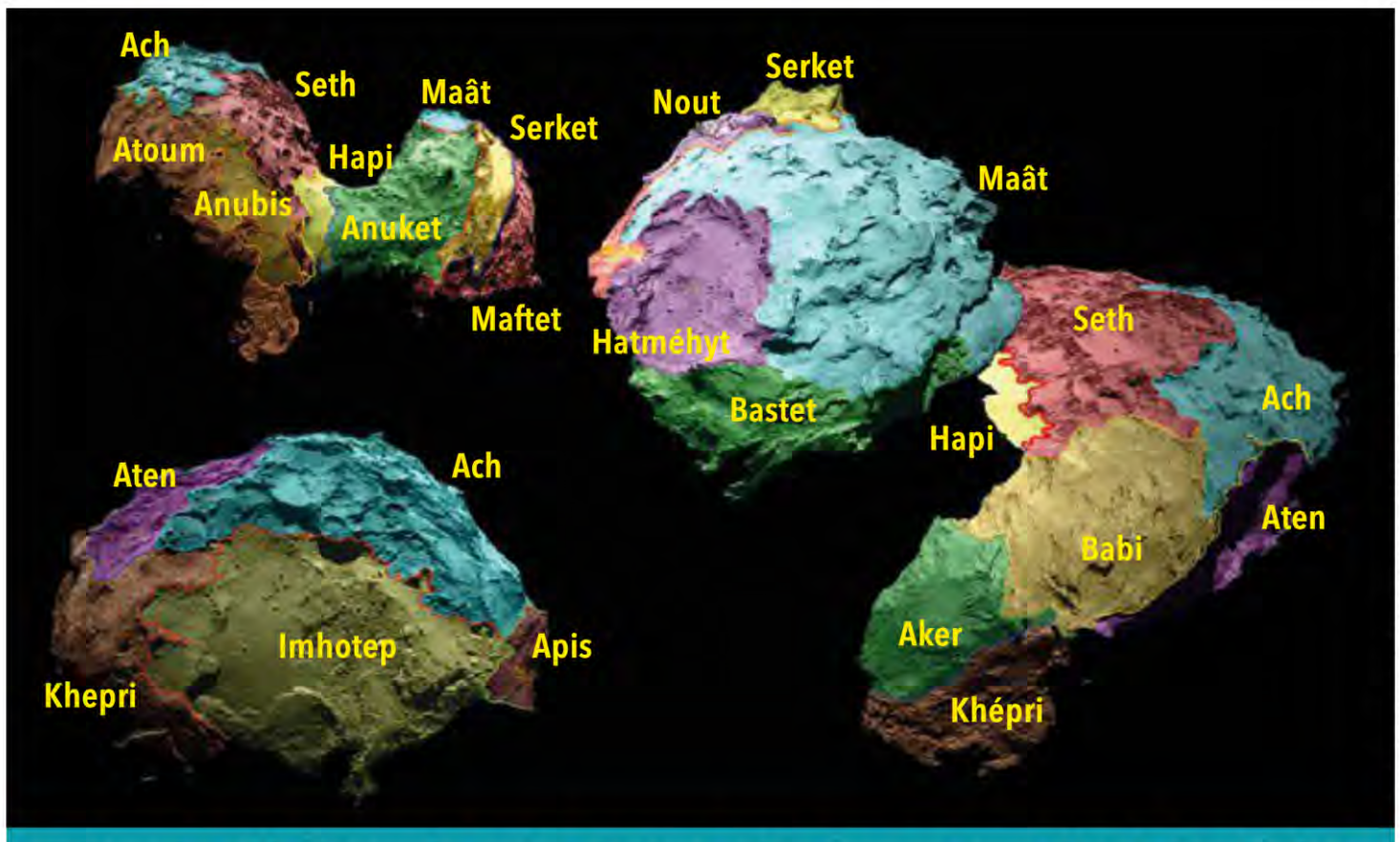
■ **Propos recueillis par Mathias Germain**

[1] A. Marchini *et al.*, *Virol J.*, *12*, 6, 2015.

Tchouri, une comète pleine de vide ?

PAR **Julien Bourdet,**
journaliste.

Observée de très près depuis des mois par la sonde Rosetta, 67P/Tchourioumov-Guérassimenko dévoile un paysage d'une étonnante diversité : falaises rocheuses, dunes, dépressions… Décryptage.



© ESA/ ROSETTA/ MPS FOR OSIRIS TEAM MPS/ UPD/ LAM/ IAA/ SSO/ INTA/ UPM/ DASP/ IDA

Tchouri a été découpée en 19 régions selon leur morphologie, baptisées de noms de divinités égyptiennes. Par exemple, Maât se distingue par ses terrains de poussière et Aten par ses dépressions circulaires.

L'image d'Épinal d'une comète ressemblant à une grosse boule de neige sale déployant sa queue de poussières et de gaz a vécu. Depuis son arrivée l'été dernier autour de la comète Tchourioumov-Guérassimenko (surnommée Tchouri par les astronomes), la sonde européenne Rosetta a dévoilé un monde étrange dont personne n'avait imaginé la complexité. Les images envoyées par la sonde révèlent à la surface de l'astre une variété de paysages insoupçonnée où des falaises rocheuses côtoient des déserts de poussières. *« Pour la première fois, nous rentrons avec surprise et émerveillement dans l'intimité de ces petits astres glacés du système solaire »*, confie le planétologue Jean-Loup Bertaux, membre de l'équipe scientifique de Rosetta au laboratoire Atmosphères, milieux, observations spatiales, à Guyancourt.

Il faut dire que la sonde lancée par l'Agence spatiale européenne est unique en son genre. Jusqu'à aujourd'hui, les rares engins qui avaient observé des comètes s'étaient contentés de les survoler rapidement à plusieurs centaines de kilomètres de distance, en donnant une image peu précise. Cette fois, Rosetta, installée en orbite à une trentaine de kilomètres seulement de Tchouri, accompagne sa comète au cours de son voyage autour du Soleil. De ce poste d'observation privilégié, elle peut détailler à loisir sa surface avec une précision inégalée. Le 14 février, la sonde a même effectué un passage en rase-mottes à 6 kilomètres seulement du sol cométaire, fournissant des clichés d'une extrême finesse, où l'on distingue des détails d'une vingtaine de centimètres.

Objet glacé. De sa position unique, la sonde peut également traquer le moindre signe d'activité de la comète qui, en se rapprochant de notre étoile, est en train de changer d'aspect. Au moment de sa rencontre avec Rosetta, en août dernier, Tchouri était à 540 millions de kilomètres du Soleil. En août prochain, elle passera au plus près de celui-ci, à 190 millions de kilomètres. Réchauffées par l'étoile, les glaces présentes sous sa surface se sublimeront et de puissants jets de gaz chargés de poussières fuseront, créant un gigantesque halo autour de l'astre.

Ce processus a déjà commencé, comme en attestent les images de panaches prises par Rosetta, mais il reste relativement faible : la sublimation dégage chaque seconde quelques litres d'eau dans l'espace. Une eau dont la composition est d'ailleurs bien différente de celle de nos océans terrestres comme l'ont révélé les mesures effectuées par la sonde (lire « L'eau sur Terre et sur Tchouri est différente », p. 53). Dans les mois qui viennent, ce taux de dégazage devrait être multiplié par 50 et donnera alors naissance à une épaisse atmosphère et à deux longues queues, l'une de gaz, l'autre de poussières.

Pour ausculter sa comète sous toutes les coutures, Rosetta a embarqué pas moins de 11 instruments scientifiques, parmi lesquels des caméras pour observer la surface à la loupe, des spectromètres pour analyser les gaz éjectés, des outils pour collecter et étudier les grains de poussière… Un arsenal à ›››

© ESA/ROSETTA/NAVCAM - CC BY-SA IGO 3.0; TRAITEMENT GUILLAUME CANNAT

Réchauffées par le Soleil, les glaces de la comète se subliment et des jets de gaz chargés de poussière s'échappent de sa surface. Les panaches sont bien visibles sur cette image prise le 3 février.

L'essentiel

- **LE DÉGAZAGE DE LA COMÈTE** explique en partie la grande variété de terrains observés.
- **L'ASTRE** serait très poreux, formé de vide à 70 % au moins.
- **LA COMPOSITION DE L'EAU COMÉTAIRE**, différente de celle de la Terre, relance la question de l'origine de l'eau sur notre planète.

Astronomie

Tchouri, une comète pleine de vide ?

© ESA/ROSETTA/NAVCAM MODIFIÉ PAR PLANETTERRE.ENS LYON

Les roches de Tchouri sont très friables. En témoignent ces éboulis au pied des falaises et la fissure (au centre) qui menace de faire s'écrouler un pan entier du relief.

›››› la hauteur de l'enjeu scientifique : les comètes constituent les vestiges de l'époque qui a vu se former le système solaire, il y a plus de 4,5 milliards d'années. En raison de leur petite taille et de leur environnement très froid, ces objets glacés auraient en effet conservé la trace presque intacte de la matière primitive qui a donné naissance à notre étoile et à son cortège de planètes.

C'est cette histoire que Rosetta tente de décrypter. Et quelques mois seulement après le début de sa mission, la moisson de la sonde européenne est déjà riche. En témoignent de nombreux articles scientifiques, dont une série de sept publiés dans la revue américaine *Science* en janvier dernier qui dressent un portrait-robot complet de Tchouri [1].

Étrange géométrie. Première révélation : Tchouri, loin d'être symétrique, comme certains modèles le prévoyaient, possède en réalité une forme complexe bilobée, qui a poussé certains à la comparer à une cacahuète géante ou à un énorme canard avec un « corps » de 4 kilomètres de long par 3 de large, un « cou » et une « tête » de 2,5 kilomètres de long sur 2 de large. *« Ce n'est pas une surprise totale,* souligne Philippe Lamy, impliqué dans la mission Rosetta au laboratoire d'astrophysique de Marseille. *On connaît en effet d'autres comètes faites, elles aussi, de deux lobes. Mais la forme de Tchouri est de loin la plus compliquée jamais observée. »*

Pour expliquer cette géométrie étrange, les astronomes avancent deux scénarios. Soit Tchouri serait née de la collision entre deux corps plus petits, des planétésimaux, qui se seraient imbriqués au début du système solaire. Soit cette géométrie serait le résultat de son activité cométaire : la zone située aujourd'hui au niveau du « cou » aurait expulsé de grandes quantités de matière, finissant par lui donner cette forme inhabituelle. Les mesures de la composition des gaz éjectés par chacun des deux lobes a montré des différences notables, la tête expulsant plus d'eau et le corps plus de dioxyde de carbone. Ce qui privilégierait la thèse du collage de deux planétésimaux. *« Mais il est encore trop tôt pour trancher,* prévient Philippe Lamy. *Il faudra attendre que l'activité de la comète devienne plus intense pour analyser plus finement les gaz éjectés et tirer des conclusions définitives. »*

Mais les découvertes de Rosetta ne s'arrêtent pas là. En tournant autour de sa comète, la sonde a multiplié les points de vue, ce qui lui a permis de cartographier une grande partie de la surface. Mis bout à bout, les clichés ont révélé une variété de terrains à laquelle personne ne s'attendait. La géologie de la surface est si diverse que les chercheurs ont découpé Tchouri en 19 régions, auxquelles ils ont donné des noms de divinités égyptiennes : Imhotep, Anubis, Hapi, Bastet... Certaines sont lisses et font penser à des dunes de sable. D'autres sont creusées de puits profonds, jusqu'à 100 mètres de diamètre et autant de profondeur. D'autres ressemblent à des paysages rocheux, avec

Les reliefs à la surface de la comète sont saisissants, telle cette falaise de 60 mètres de haut qui surplombe une pente recouverte de rochers et de fines poussières. Les rochers sont probablement tombés de la falaise. Quant aux poussières, elles ont dû être éjectées par l'activité de la comète avant de retomber sur le sol.

© ESA/ROSETTA/NAVCAM - CC BY-SA IGO 3.0

Ces dépressions circulaires seraient dues à l'effondrement du plafond de cavités créées par des explosions de gaz sous la surface de la comète.

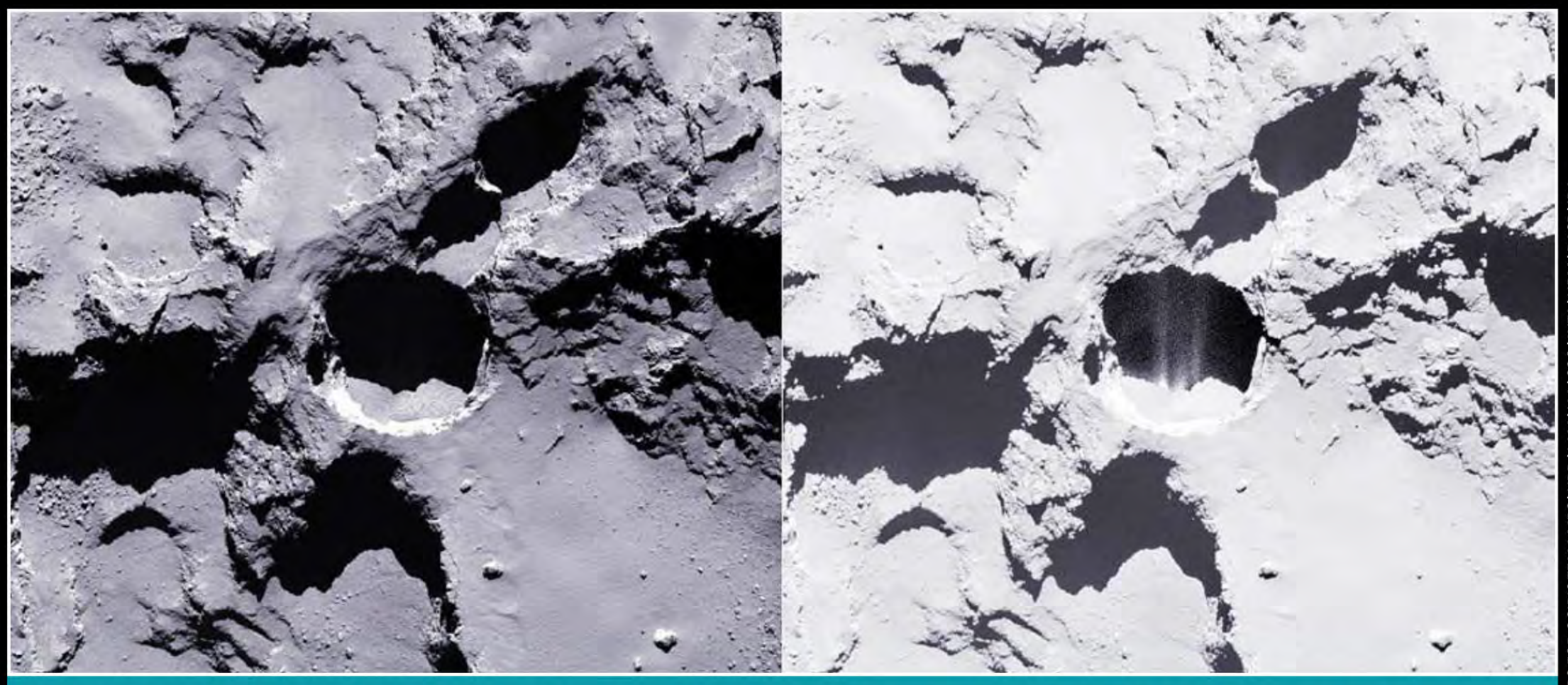
© ESA/ ROSETTA/ MPS FOR OSIRIS TEAM MPS/ UPD/ LAM/ IAA/ SSO/ INTA/ UPM/ DASP/ IDA

des falaises, dont une de 900 mètres de haut, au pied desquelles se sont accumulés des éboulis. D'autres encore sont parsemées de larges dépressions circulaires de plusieurs centaines de mètres de diamètre à l'allure de cratères.

Violents dégazages. Comment de telles structures ont-elles pu se créer ? *« Même si nous ne comprenons pas tout, loin de là, nous pensons que le dégazage de la comète joue un rôle crucial pour expliquer ces formations »*, avance Philippe Lamy. En se sublimant, les glaces présentes sous la surface évacuent de la matière. Une partie est définitivement perdue dans l'espace : d'après les calculs des astronomes, la surface de la comète serait vaporisée sur deux mètres d'épaisseur en moyenne à chaque passage près du Soleil, tous les six ans et demi environ. Mais une autre fraction de la matière éjectée retomberait sur l'astre sous forme de poussières – ou de « graviers » de quelques centimètres – dessinant alors ces grandes étendues lisses.

Relativement calme la plupart du temps, ce dégazage se ferait parfois de manière beaucoup plus violente : d'immenses poches de gaz exploseraient sous la surface, arrachant au passage de gros fragments dont certains seraient éjectés en orbite – Rosetta en a observé autour de l'astre – et d'autres retomberaient sur le sol cométaire, formant les « rochers » visibles sur la surface. Au cours de ce phénomène, l'éjection du gaz se ferait uniquement par un petit orifice, qui pourrait correspondre à ces puits d'où s'échappent des jets que Rosetta a mis en évidence. Dans un second temps, une fois le gaz évacué, ce qui reste du plafond de ces cavités s'effondrerait et formerait alors ces grandes dépressions photographiées par la sonde.

Quant aux falaises rocheuses, leur origine reste aujourd'hui bien énigmatique. Toutefois, une chose est sûre : *« Ces formations sont trompeuses, elles ont l'air solides et, pourtant, elles ne le sont pas,* souligne Jean-Loup Bertaux. *La preuve, ce sont ces corniches qui menacent de s'effondrer sous leur propre poids, alors que la gravité est extrêmement faible sur Tchouri, 50 000 fois moins importante que sur Terre. »* Même constat pour les grains de poussière collectés par la sonde : ceux-ci se fragmentent immédiatement en arrivant ›››



© ESA/ ROSETTA/ MPS FOR OSIRIS TEAM MPS/ UPD/ LAM/ IAA/ SSO/ INTA/ UPM/ DASP/ IDA

D'immenses puits profonds de 100 mètres parsèment la surface de Tchouri. Tels des geysers, ces puits trahiraient la présence de grandes poches d'où des gaz s'échapperaient à grande vitesse. En augmentant le contraste de cette image (à droite), on distingue l'un de ces jets jaillir du trou.

Tchouri, une comète pleine de vide ?

»»» sur les instruments. Tout cela fait dire aux scientifiques que les roches de Tchouri sont bien différentes de celles qui sont présentes sur Terre : constituées d'un mélange intime de poussières et de glace, elles sont extrêmement friables.

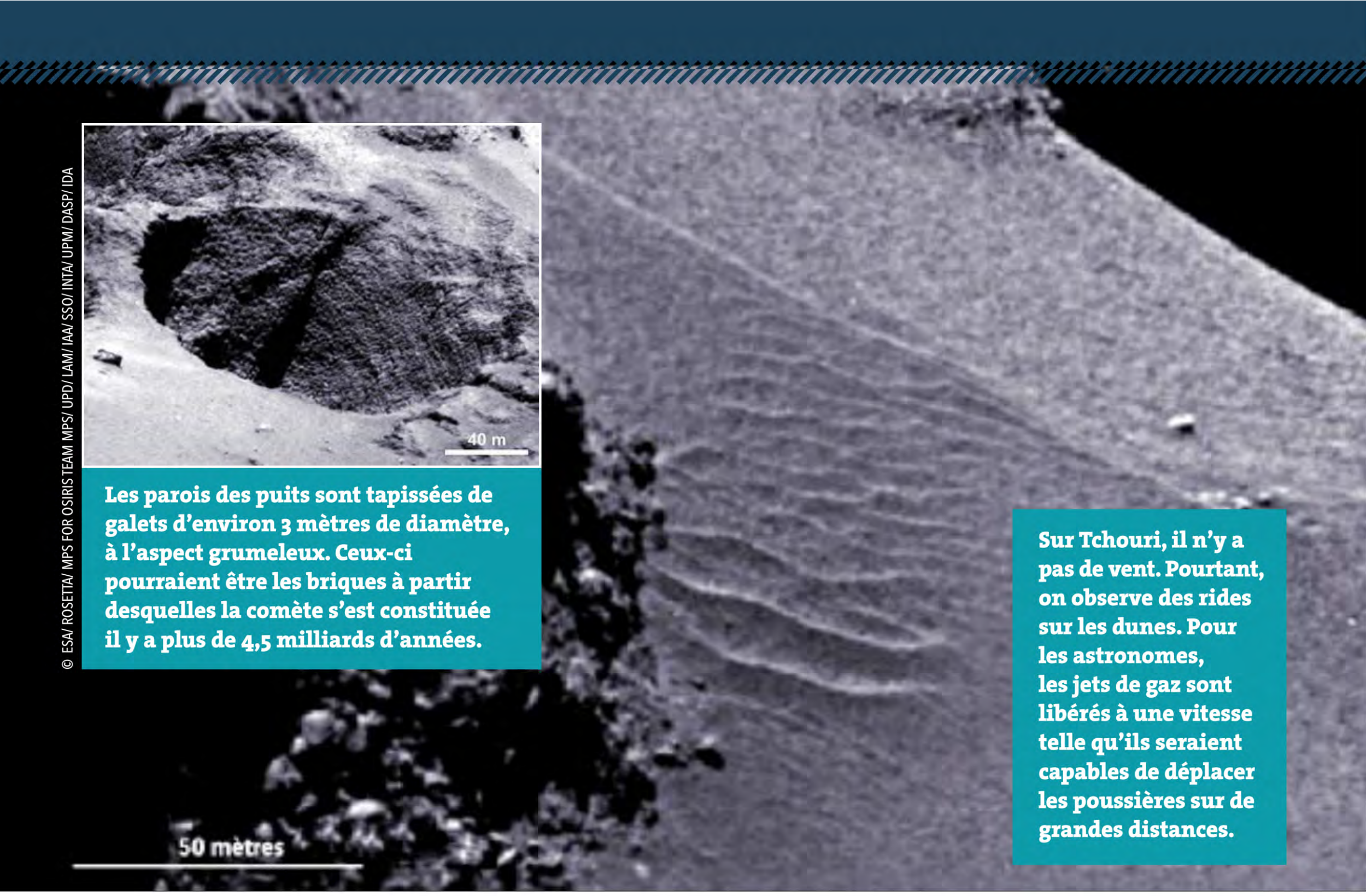
Immense gruyère. Une conclusion confirmée par la mesure de la densité de l'astre réalisée par Rosetta. Valant environ 470 kilogrammes par mètre cube, cette densité est deux fois inférieure à celle de l'eau. Tchouri serait donc très poreuse, formée de vide, au moins à 70 %. *« Pour expliquer une telle valeur, il faut que le matériau de la comète soit constitué de vide, non seulement à l'échelle microscopique mais aussi à plus grande échelle »*, explique Yves Langevin, membre de l'équipe scientifique de Rosetta à l'Institut d'astrophysique spatiale d'Orsay. Tel un immense gruyère, Tchouri pourrait donc bien être remplie de trous sous sa surface.

À la lumière de ce résultat, les scientifiques en sont désormais persuadés : Tchouri est bien un fossile du système solaire. La nature du matériau qui la constitue colle en effet parfaitement avec la théorie des astronomes pour expliquer la formation des comètes et des autres corps du système solaire. Dans leur scénario, les particules de matière microscopiques qui composaient le nuage de gaz et de poussières qui a donné naissance à notre système se seraient agglutinées pour fabriquer des objets de plus en plus gros, jusqu'aux planétésimaux de plusieurs kilomètres. Certains d'entre eux formeront plus tard, en s'entrechoquant, les planètes gazeuses et rocheuses, tandis que d'autres resteront en l'état : les comètes d'un côté et les astéroïdes de l'autre. *« Ce scénario implique que les matériaux qui constituent Tchouri ne se sont pas emboîtés de manière parfaite au moment de sa formation, laissant des vides entre eux,* avance Yves Langevin. *Et c'est bien ce qu'on constate. »*

Mieux encore : les traces de ce processus d'accrétion seraient toujours visibles à la surface de l'astre, et Rosetta les aurait même déjà observées. Sur les parois des puits détectés par la sonde, les images montrent en effet la présence de structures très régulières, dont la taille est d'environ 3 mètres et dont l'aspect grumeleux fait penser à la chair de poule. Selon certains, ces gros galets constitueraient les briques de base à partir desquelles Tchouri se serait construite. D'après certains modèles, en effet, les objets formés par l'agglutination de grains de matière primordiale se seraient arrêtés de grossir à partir de quelques mètres. Ils se seraient ensuite agglomérés pour former des corps plus gros, dont Tchouri serait un exemple. Mais les chercheurs n'en sont encore qu'au stade des spéculations.

D'autant que ce phénomène pourrait bien ne pas être le seul à expliquer la genèse de la comète. En effet, sur les falaises, les clichés de Rosetta ont révélé d'autres structures, elles aussi intrigantes. Celles-ci forment des strates qui remonteraient peut-être à l'époque de la formation de Tchouri. *« On sait que dans la nébuleuse protoplanétaire, les*

Les parois des puits sont tapissées de galets d'environ 3 mètres de diamètre, à l'aspect grumeleux. Ceux-ci pourraient être les briques à partir desquelles la comète s'est constituée il y a plus de 4,5 milliards d'années.



Sur Tchouri, il n'y a pas de vent. Pourtant, on observe des rides sur les dunes. Pour les astronomes, les jets de gaz sont libérés à une vitesse telle qu'ils seraient capables de déplacer les poussières sur de grandes distances.

© ESA/ ROSETTA/ MPS FOR OSIRIS TEAM MPS/ UPD/ LAM/ IAA/ SSO/ INTA/ UPM/ DASP/ IDA

mélanges de matière ont été très importants, explique Philippe Lamy. *Et Tchouri pourrait ainsi être le fruit de l'empilement progressif de plusieurs couches.* »

Climat rude. À moins, pensent certains, que ces strates ne soient en réalité le résultat des chocs thermiques auxquels la comète est exposée en permanence. Ces chocs sont aussi invoqués pour expliquer la présence généralisée d'éboulis et de fissures sur Tchouri. Du fait de la rotation de l'astre sur lui-même en douze heures seulement, la surface endure des contrastes de température extrêmes, passant de −90 °C la nuit à −40 °C le jour. Ces variations finissent par fracturer les roches.

Pour trancher ce débat et tous les autres en suspens, les scientifiques attendent avec impatience que l'activité de la comète atteigne son maximum. « *On pourrait alors voir comment le dégazage de la comète modifie la surface de Tchouri et faire la distinction entre les phénomènes d'érosion récents, et les processus primordiaux, liés à la genèse de la comète* », s'enthousiasme Philippe Lamy.

De son côté, l'atterrisseur Philae pourrait lui aussi apporter son lot de révélations. Largué par Rosetta, le petit robot s'est posé sur la comète le 12 novembre dernier. Mais après une série de rebonds, il s'est retrouvé coincé entre des rochers, dans un endroit peu éclairé. Au bout de deux jours de mesures, incapable de recharger ses batteries avec ses panneaux solaires, il est entré en hibernation. Mais les responsables de la mission espèrent que le robot se réveillera en mai, voire plus tôt, lorsque la zone où il se trouve sortira de l'ombre.

Une fois en état de marche, Philae tentera de prélever des échantillons à une vingtaine de centimètres de profondeur. Une manœuvre qui avait échoué au mois de novembre. Si elle réussit cette fois, les chercheurs auront alors accès à un matériau totalement préservé de l'érosion spatiale. De quoi révéler de nombreux autres secrets sur l'histoire de Tchouri. ■

L'eau sur Terre et sur Tchouri est différente

C'est « la » grande surprise de la mission Rosetta : alors que beaucoup pensaient que les comètes avaient pu apporter l'essentiel de l'eau sur Terre en venant s'y écraser en nombre dans leur jeunesse, la sonde spatiale montre que l'eau de la comète Tchouri est en réalité très différente de celle de nos océans. Ses instruments ont découvert en effet que le rapport entre l'hydrogène et son isotope, le deutérium, contenus dans l'eau dégazée par Tchouri est trois fois supérieur à celui qui est mesuré sur Terre [1]**. Ces astres glacés ne seraient donc pas la source principale de l'eau terrestre. Selon certains, l'origine du précieux liquide serait plutôt à chercher du côté des astéroïdes.**

[1] K. Altwegg *et al.*, *Science, 347,* 6220, 2015..

[1] N. Thomas *et al.*, *Science, 347,* 6220, 2014.

Pour en savoir plus

› H. Cabibbo, « L'énigme de l'origine de l'eau sur Terre survit à Rosetta », *La Recherche*, février 2015, p. 24.

› J. Bourdet, « Rosetta fait des plans sur la comète », *Les Dossiers de La Recherche,* octobre-novembre 2014, p. 74.

François Galgani « Trop de plastiques dans les océans »

Deux études récentes apportent un éclairage sur l'étendue de la pollution des mers par le plastique. Selon François Galgani, océanographe à l'Ifremer, si rien n'est fait, la situation pourrait devenir dramatique.

LA RECHERCHE : Connaît-on l'ampleur de la pollution des mers par le plastique ?

FRANÇOIS GALGANI : Deux études chiffrées tentant de mesurer l'ampleur du phénomène viennent de sortir. La première, internationale, a été publiée en décembre 2014 [1]. Elle avait pour but d'estimer la pollution de surface par les plastiques flottants. Selon ses résultats, 270 000 tonnes de déchets en plastique flotteraient aujourd'hui à la surface des océans, dont 10 % sont des microparticules de moins de 5 millimètres résultant de la fragmentation de morceaux plus gros [fig. 1]. La seconde étude, américaine, publiée en février 2015, émane de l'équipe de la biologiste Jenna Jambeck de l'université de Géorgie, aux États-Unis [2]. Elle évalue à 8 millions de tonnes en moyenne la quantité de plastique déversée par les continents dans la mer en 2010 [fig. 2]. Ces études marquent un tournant dans la mesure où elles s'inscrivent dans une démarche d'évaluation globale de la pollution des océans. Jusqu'à présent, les travaux d'exploration n'avaient été réalisés que dans certaines zones océaniques connues pour accumuler les déchets : les gyres, gigantesques tourbillons d'eau formés par les courants marins.

Ces deux études ont-elles suivi la même méthode ?

F.G. : Chacune a eu une approche très différente. Prenons la première à laquelle nous avons participé. Pour estimer la quantité de déchets en plastique flottant à la surface des mers, nous sommes partis de 24 études qui avaient déjà fait cette évaluation pour certaines zones maritimes. Et nous avons utilisé un modèle de simulation numérique mis au point dans les années 1970 par la marine américaine. Ce modèle permet d'étudier l'impact des courants marins sur la dispersion de particules dans une zone maritime et, *in fine,* de prédire la densité de ces particules dans cette zone. Nous l'avons validé, c'est-à-dire que nous avons vérifié, à partir de prélèvements effectués dans le passé dans différentes zones étudiées, que l'on retrouvait bien la concentration actuelle de particules de plastique dans ces mêmes zones. Puis nous avons extrapolé en appliquant ce modèle à un groupe de 1571 sites de prélèvements formant un échantillon représentatif de l'ensemble des mers et océans. La seconde étude

© GALGANI

Fig.1 Déchets de plastique à la surface des mers

5 250 MILLIARDS DE PARTICULES DE PLASTIQUE flottent à la surface des océans (en blanc). Cette première estimation globale de la pollution résulte d'une modélisation des données de 24 campagnes océanographiques réalisées ces six dernières années. Cette modélisation montre que tous les océans sont touchés. Conséquence de cette pollution : l'ensemble des écosystèmes océanographiques sont menacés ainsi que certaines espèces marines.

© DUMPARK/ NEW ZEALAND - ETUDE : HTTP://APP.DUMPARK.COM/SEAS-OF-PLASTIC-2/

cherchait, elle, à évaluer la quantité de plastique déversée tous les ans à la mer depuis les continents.

Comment les chercheurs américains ont-ils procédé ?

F.G. : Leur méthode est entièrement statistique. À partir de la production mondiale de plastique et de la densité de population dans les zones littorales, ils ont estimé la quantité de plastique consommée en 2010 dans les 192 pays côtiers. Puis ils ont croisé ces données avec le taux de recyclage des déchets en plastique dans ces pays. Et ils en ont déduit la quantité de matière plastique qui finit logiquement sa vie dans les mers. La Chine apparaît comme le plus mauvais élève avec environ 2,8 millions de tonnes rejetées à la mer en 2010. Elle est suivie par l'Indonésie, les Philippines et le Vietnam. Aucun des 23 pays européens disposant d'une zone côtière ne figurent dans les 20 premiers pays. Mais si on les mettait tous ensemble, ils arriveraient en 18e position, au niveau du Maroc. Aux 8 millions de tonnes de déchets plastiques déversés dans les mers depuis les continents, il convient d'ajouter ceux rejetés par les bateaux, que l'on peut estimer à 4 millions de tonnes. C'est donc environ 12 millions de tonnes de déchets en plastique qui ont été déversés à la mer en 2010.

Ce tonnage est sans commune mesure avec votre estimation. D'où vient un tel décalage ?

F.G. : En fait, chaque étude n'évalue pas du tout la même chose. Elles sont complémentaires mais aucune n'est totalement satisfaisante. La première s'intéresse uniquement aux déchets légers et assez homogènes qui flottent à la surface des océans et elle extrapole à partir de prélèvements réels effectués en mer. Au contraire, la seconde évalue tout ce qui est déversé dans les mers. Elle ne tient donc pas compte du fait qu'une partie des déchets de surface se dégradent et disparaissent avec le temps. Mais surtout elle englobe tous les déchets en plastique, aussi bien ceux qui flottent que ceux qui coulent et qui constituent la majeure partie des plastiques déversés dans les océans. Dans cette catégorie, on trouve notamment tous les objets en polychlorure de vinyle. Mais aussi beaucoup de sacs et d'emballages : souvent, on leur ajoute des carbonates pour leur donner plus de consistance et qu'ils soient plus rigides. Résultat, entraînés par leur poids, ils coulent et finissent par tapisser les fonds marins. Des lieux d'où ils ne risquent pas de disparaître rapidement, car privés de lumière et d'oxygène, ils ne se dégradent que très lentement.

L'essentiel

- **LA POLLUTION DES MERS par le plastique pourrait atteindre 80 millions de tonnes en 2025.**
- **LE PRINCIPAL RISQUE est la migration d'espèces sur des radeaux de plastique vers de nouveaux écosystèmes.**
- **POUR RÉDUIRE CETTE POLLUTION, à l'avenir, on envisage de produire des plastiques biologiques entièrement biodégradables.**

On sait que, en surface, les déchets en plastique ont tendance à s'accumuler dans les gyres océaniques. En est-il de même sur le fond des océans ?

F.G. : Pas du tout. En surface, on a commencé par repérer des concentrations élevées de plastique dans les cinq grands gyres océaniques, Atlantique Nord et Sud, Pacifique Nord et Sud et celui de l'océan Indien. Depuis les années 1970, les expéditions se sont focalisées sur ces zones. Ensuite, on a découvert que la densité de déchets en plastique la plus élevée au monde se trouvait ›››

Environnement

« Trop de plastiques dans les océans »

Entraîné par son poids, ce sac en plastique va finir sa course sur le fond marin. Là, privé de lumière et d'oxygène, il se dégradera très lentement.

>>> en Méditerranée, une mer fermée où il n'y a pas de gyre, et qui concentre 30 % du trafic maritime mondial. Mais sur les fonds, l'accumulation des déchets n'a rien à voir avec la surface. Car les phénomènes physiques et les courants sont très différents. En fait, on n'a pas encore réalisé de campagnes d'exploration suffisantes pour évaluer où se trouvent les déchets en plastique sur les fonds. Mais on en a déjà trouvé dans une zone inattendue, l'océan Arctique. Et on peut penser qu'ils s'accumulent dans des formations particulières, comme les grandes fosses et les canyons des zones côtières. À mon avis, d'ici à quatre ou cinq ans, on connaîtra mieux l'ampleur et la localisation de cette pollution.

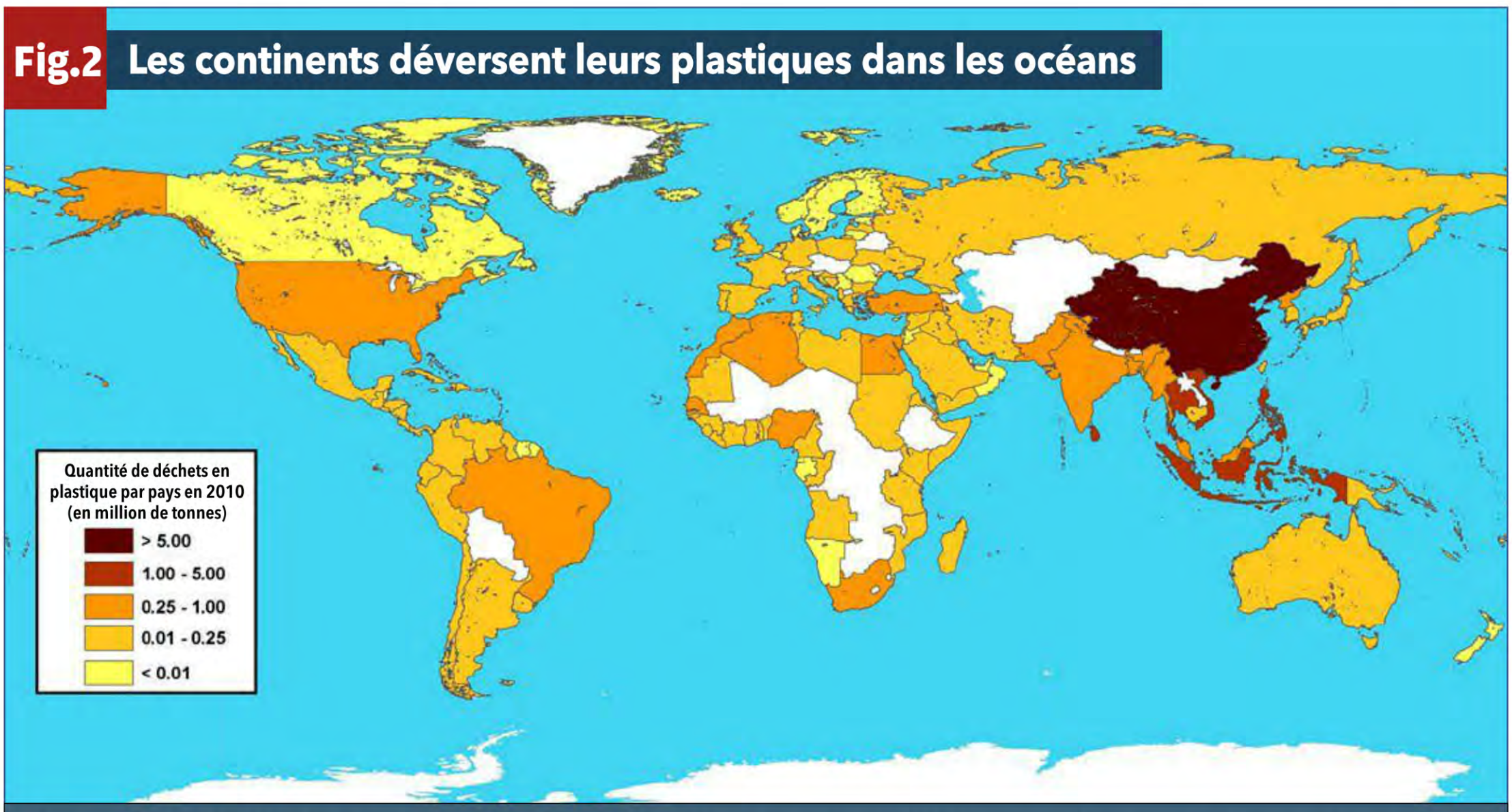
Risque-t-elle d'augmenter ?

F. G. **:** Oui, car la production mondiale de plastique continue de croître. Selon les prévisions de l'étude américaine, la quantité de plastique déversée depuis les continents passerait de 8 millions de tonnes en moyenne en 2010 à 80 millions de tonnes en 2025, si les systèmes de gestion de déchets ne sont pas améliorés et si la consommation de plastique continue d'augmenter au rythme actuel. Une prévision de croissance phénoménale à laquelle je ne souscris pas totalement. Car on assiste à une prise de conscience des problèmes de pollution. Cela se traduit par une volonté de recycler les déchets et aussi de modérer la consommation. Ainsi, de plus en plus de pays interdisent les sacs en plastique à usage unique, comme cela va être le cas l'année prochaine en France.

Quels sont les principaux dangers liés à ces déchets de plastique ?

F.G. : En mer, les plastiques causent trois grands types de dégâts environnementaux. Le plus inquiétant à mon sens est la migration d'espèces vers de nouveaux environnements. Les morceaux de plastique se transforment en « radeaux » sur lesquels s'accrochent des micro-organismes et des polluants.

Fig.2 Les continents déversent leurs plastiques dans les océans



© JENNA R. JAMBECK ET AL./ SCIENCE, 347, 768, 2015/AAAS

LES POPULATIONS DE 192 PAYS vivant à quelque 50 kilomètres des côtes ont jeté 8 millions de tonnes de plastique dans la mer en 2010. Avec 2,8 millions de tonnes, la Chine (en rouge) est le pays le plus pollueur. En Europe, les 23 pays côtiers mis ensemble occupent la 18e position, à égalité avec le Maroc, alors qu'aucun d'eux ne figure dans la liste des 20 premiers pays.

© PATRICIA DANNA/ BIOSPHOTO

Ainsi, après le tsunami qui a frappé le Japon en mars 2011, des scientifiques canadiens ont identifié 54 espèces inconnues au Canada, sur un seul morceau de polyester qui avait dérivé depuis l'archipel nippon. C'est considérable ! Une telle dispersion d'espèces peut modifier durablement des écosystèmes tout en véhiculant des pathogènes.

Deuxième type de dégât : l'étranglement. Lorsqu'on perd des filets de pêche, dont la plupart sont en polymère, ils continuent à pêcher et étranglent des organismes. Mais on a très peu d'études chiffrées sur ce phénomène. En Méditerranée, on estime toutefois que de 2 à 3 % des stocks de merlus sont perdus à cause des filets abandonnés. Enfin, le dernier problème, c'est l'ingestion. Certaines espèces y sont très sujettes, les tortues par exemple. Elles ne font pas la différence entre une méduse et un sac en plastique : dès qu'elles voient quelque chose de blanc flotter à la surface, elles l'avalent avec le risque d'avoir une occlusion intestinale. Ce phénomène touche aussi certains oiseaux, comme les albatros, qui ont une poche dans l'estomac dans laquelle ils gardent les déchets. Mais en dehors de ces dangers précis, le plastique est excrété assez vite par beaucoup d'espèces sans causer de dégât particulier. Ainsi les copépodes, organismes de base du plancton, l'éliminent en quelques heures et les moules en quelques jours. Il y a donc peu de risque de le retrouver chez l'homme *via* la chaîne alimentaire.

Peut-on améliorer cette situation ?

F.G. : Les mesures préventives sont toujours les meilleures, car le curatif coûte cher. Celle qui fait l'unanimité, c'est le recyclage. Actuellement, il est limité à 22 % des emballages, car il faut que la matière soit le plus homogène possible. Mais l'idée est de multiplier les usines de tri pour augmenter le taux de recyclage. Le plastique d'origine biologique pourra aussi constituer une solution, mais seulement s'il est entièrement biodégradable. ■

Propos recueillis par Marie-Laure Théodule

[1] M. Eriksen *et al.*, *PlosOne*, doi :10.1371/journal.pone.0111913, 2014.

[2] J. R. Jambeck *et al.*, *Science, 347*, 6223, 2015.

Des déchets, des bactéries et des bioplastiques

À l'heure où l'on interdit les sacs en plastique, un consortium breton met au point un procédé dans lequel des bactéries marines produisent des plastiques biodégradables à partir de détritus de fruits et légumes.

PAR **Stéphane Bruzaud,**
professeur des universités au laboratoire d'ingénierie des matériaux de Bretagne (université de Bretagne-Sud).

© UNIVERSITÉ BRETAGNE SUD (LIMATB)

D'abord sous forme de poudre, le bioplastique produit par des bactéries marines peut recevoir des colorants avant d'être moulé.

Les gobelets et les assiettes en plastique pour le pique-nique du dimanche, c'est bientôt fini. Dans le cadre du projet de loi sur la transition énergétique, l'Assemblée nationale a voté le 10 octobre 2014 l'interdiction des sacs de caisse en plastique à usage unique à partir du 1er janvier 2016. Mais aussi celle de la vaisselle jetable en plastique non compostable en 2020.

Le moment est donc venu de s'intéresser de plus près aux bioplastiques dont le marché, encore embryonnaire, est appelé à se développer. Car avec un taux de croissance de 3,9 % entre 2012 et 2013, la production mondiale de matières plastiques continue d'augmenter : elle a atteint 299 millions de tonnes en 2013, dont 40 % environ étaient destinées au marché de l'emballage. Et malgré une croissance exceptionnelle des plastiques biosourcés, de l'ordre de 20 % par an, plus de 99 % des plastiques sont encore d'origine pétrochimique. Or cette forte dépendance de l'industrie de la plasturgie à l'égard des ressources fossiles risque d'être difficile à gérer à terme. En effet, même si les avis ›››

Des déchets, des bactéries et des bioplastiques

››› divergent encore sur la cinétique d'épuisement des ressources fossiles, celles-ci vont de toute évidence se raréfier progressivement.

La nécessité de développer rapidement des nouveaux matériaux est d'autant plus cruciale que l'échéance se rapproche pour les sacs en plastique. Plus précisément, leur distribution gratuite ou leur vente sera interdite à la caisse des magasins, sauf s'ils répondent à deux conditions particulières : être biosourcés et compostables.

Que signifient ces deux termes ? Bien qu'utilisés dans le langage courant, ils ne sont pas définis par les divers dictionnaires de la langue française, car ils relèvent de normes techniques. Le premier, biosourcé, qualifie un plastique dont une fraction au moins est issue d'une matière première renouvelable d'origine végétale ou animale. On utilise la datation au carbone-14 pour déterminer ce taux : certains plastiques peuvent être totalement biosourcés quand d'autres ne le sont que très partiellement. Dans la pratique, on applique la norme ASTM D6866 pour classer les plastiques selon leur teneur en matière renouvelable.

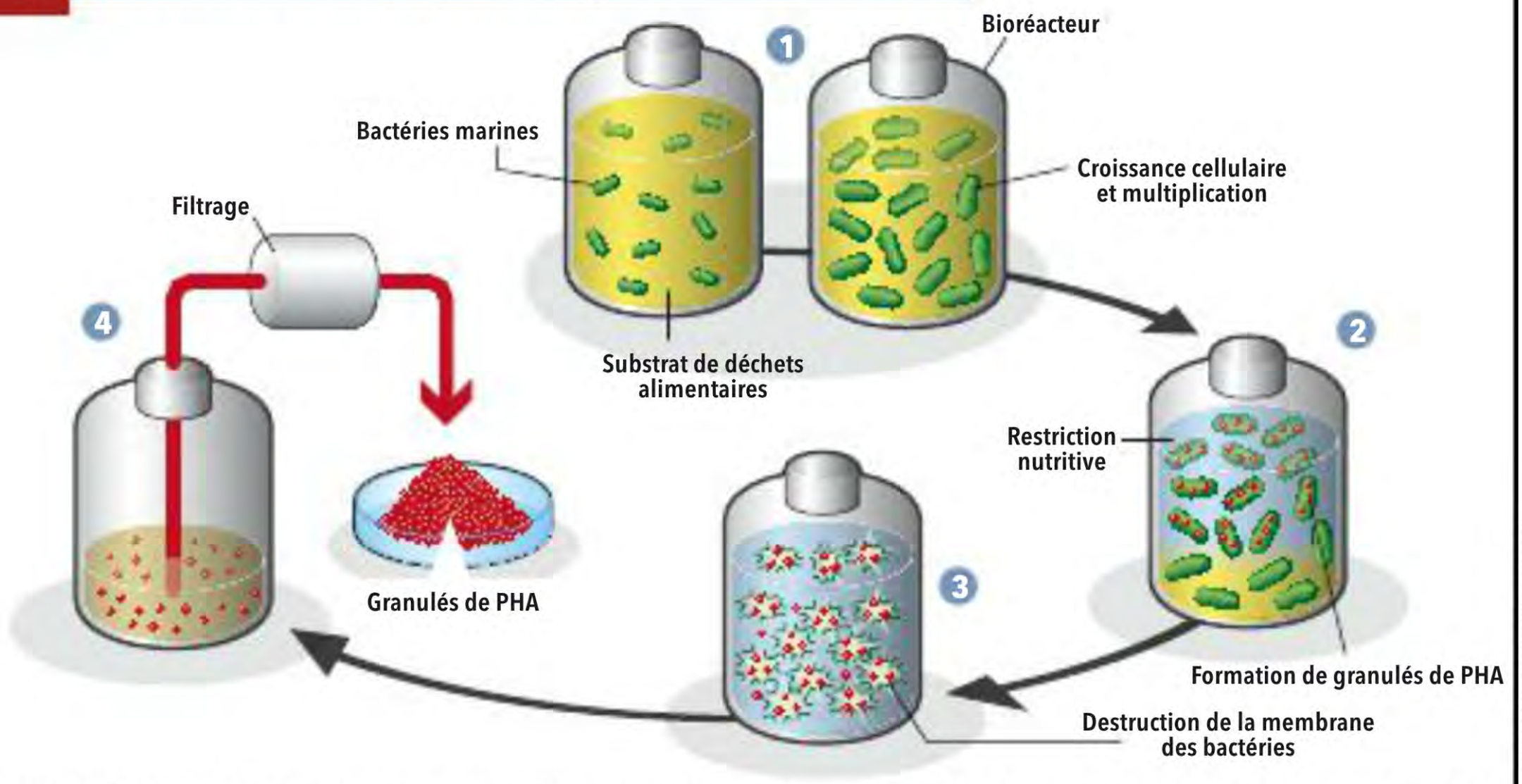
Préserver les terres cultivables. Quant au second terme, compostable, il désigne des plastiques capables de se dégrader en fin de vie par fermentation biologique en les mélangeant ou non à divers déchets organiques. Ce terme est défini en Europe par une norme reconnue au niveau mondial, la NF EN 13432. Elle décrit les conditions précises à satisfaire pour qu'un emballage puisse être déclaré biodégradable par voie de compostage dans des conditions industrielles.

Mais comment produire ces plastiques biosourcés et compostables ? Il faut trouver un procédé respectueux de l'environnement. Et qui permette de transformer des matières premières d'origine végétale en un produit industriel compostable ayant les mêmes propriétés que les matières plastiques. Actuellement, la majeure partie des polymères* biosourcés disponibles sur le marché est issue de la transformation des sucres et des amidons complexes extraits de différentes plantes : maïs, blé, canne ou betterave à sucre... Leur production nécessite donc de mobiliser des surfaces cultivables, ce qui n'est pas souhaitable, car cela se fait au détriment des cultures alimentaires. Une autre catégorie de polymères biosourcés est produite à partir d'huiles

*UN POLYMÈRE est une macromolécule qui constitue la matière de base d'un plastique.

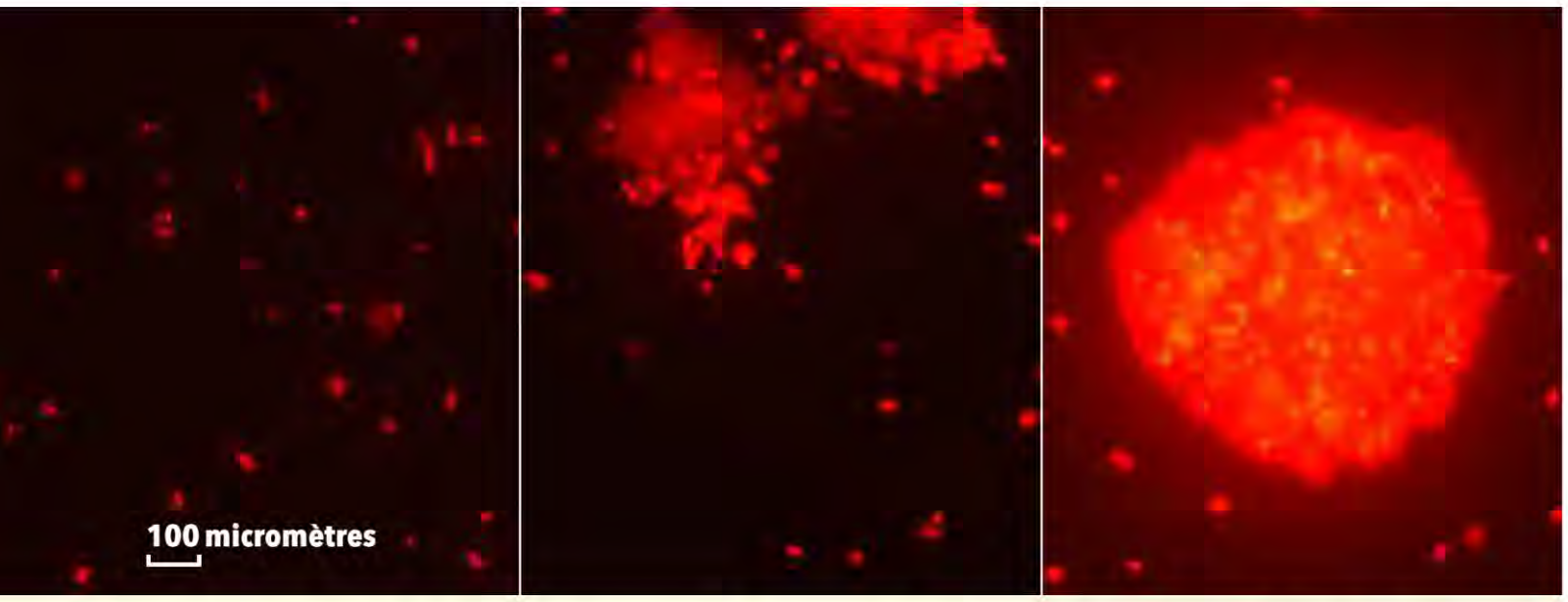
© UNIVERSITÉ BRETAGNE SUD (LIMATB)

Fig.3 Production des polyhydroxyalcanoates ou PHA



© INFOGRAPHIE BRUNO BOURGEOIS

LES BACTÉRIES MARINES mises en culture dans un bioréacteur avec un substrat riche en carbone grandissent et se multiplient (1). Elles sont transvasées dans un autre bioréacteur où l'apport en éléments nutritifs (azote, phosphore, etc.) est réduit. Privées de nourriture, les bactéries font des réserves et accumulent des granulés de PHA (2). La membrane de la cellule bactérienne est détruite par pression mécanique, avec des enzymes ou des agents chimiques (les tensio-actifs) (3). Après avoir été filtrés, les granulés de PHA sont récupérés (4).



Les granulés de PHA (en rouge) s'accumulent peu à peu dans le cytoplasme de cette bactérie (en noir). Cette image au microscope montre le niveau de production au bout de 10 heures, 50 heures et 67 heures (de gauche à droite).

végétales : huiles de palme, de soja, de colza, de ricin... Ce qui pose également le problème d'occupation des terres cultivables. En outre, beaucoup de ces bioplastiques ne sont pas compostables.

Pour contourner ces deux problèmes – mobilisation de terres agricoles et biodégrabilité incomplète – mais aussi pour valoriser une filière de production locale, notre laboratoire, le LIMATB (laboratoire d'ingénierie des matériaux de Bretagne), s'est intéressé à une certaine famille de polymères, les polyhydroxyalcanoates ou PHA. Ces polyesters* nous paraissent très prometteurs pour trois raisons : on peut les faire synthétiser entièrement par des bactéries placées dans un substrat de matière carbonée ; ils peuvent servir à la fabrication d'emballages ; ils sont totalement biodégradables.

De nombreux types de PHA ont été identifiés aujourd'hui. Mais le premier d'entre eux, le poly3-hydroxybutyrate avait été découvert par hasard, dès 1926 par le Français Maurice Lemoigne à l'Institut Pasteur, chez la bactérie *Bacillus megaterium*. Le biologiste avait constaté que des suspensions aqueuses de cette bactérie s'acidifient lorsqu'elles sont privées d'oxygène. Il attribua ce phénomène à l'acide ß-oxobutyrique. Et quelques années plus tard, il mit en évidence la formation d'un matériau solide, le PHA, dans le cytoplasme de cette bactérie, suite à l'acidification du milieu. Il suggéra dans ses publications que ce matériau était issu *« de la déshydratation et de la polymérisation de l'acide ß-oxobutyrique »*. Et l'on a compris par la suite que les PHA sont synthétisés et stockés dans le cytoplasme des cellules bactériennes grâce à une enzyme, la PHA synthase.

Cependant, en raison du développement de la pétrochimie tout au long du XX^{e} siècle, la découverte des PHA resta relativement confidentielle pendant plusieurs décennies. C'est seulement vers les années 1990 que les scientifiques s'intéressèrent à ces polymères en raison de leur caractère biodégradable. Depuis lors, plus de 300 souches bactériennes capables de produire des PHA ont été recensées par différentes équipes à travers le monde. Une telle variété présente un grand intérêt, car elle permet d'optimiser le choix du couple bactérie-substrat carboné afin d'obtenir le meilleur rendement.

Tirer parti des ressources locales. En pratique, pour produire des PHA, nous utilisons un procédé de fermentation qualifié de discontinu, car il se déroule en deux étapes. La première phase consiste à mettre en culture les bactéries avec un substrat riche en carbone, pendant plusieurs heures, dans un bioréacteur, afin qu'elles grossissent et se multiplient. Le bioréacteur est une cuve qui permet de contrôler les conditions de fermentation : température, pression en oxygène et acidité, entre autres. Nous avons décidé d'utiliser des bactéries marines issues d'une collection privée appartenant à l'université de Bretagne-Sud (UBS). Elles proviennent de souches isolées en mer d'Iroise sur différents mollusques (palourdes, coques, seiches...). Pour le substrat, nous avons choisi des déchets végétaux issus de la filière agroalimentaire bretonne (fruits et légumes) afin de nous affranchir des cultures agricoles à vocation alimentaire. Et aussi parce que notre objectif est de développer l'économie territoriale en utilisant des ressources disponibles localement.

À l'issue de cette première phase, l'étape de production des PHA proprement dite peut commencer. Elle va durer 70 heures environ. Nous transvasons notre mélange dans un second bioréacteur où l'on diminue le substrat, afin de restreindre la quantité d'éléments nutritifs (magnésium, azote ou phosphore) nécessaires à la croissance et au développement des bactéries. C'est lorsque les bactéries sont ainsi privées de nourriture qu'elles se mettent à fabriquer et à accumuler dans leur cytoplasme des granulés de PHA en tant que substance carbonée de réserve. En raison de leur faible solubilité, ces granulés, dont la taille est inférieure à un micron, exercent une pression négligeable sur les parois de la cellule bactérienne. C'est donc un matériau de stockage de carbone et d'énergie idéal pour les bactéries.

Nous avons en outre cherché à optimiser la production des PHA en fonction des différents couples substrat-bactérie possibles et afin d'obtenir une production aux qualités constantes. Nous avons donc mis au point une technique de suivi en temps réel de cette production. Pour cela, nous injectons dans le cytoplasme des bactéries un marqueur fluorescent, qui réagit aux composés lipidiques des granulés de PHA. Cela nous permet d'évaluer qualitativement et quantitativement la teneur en PHA du milieu de culture. En pratique, nous parvenons à produire plusieurs grammes de PHA par litre.

Enfin, dernière étape pour obtenir du bioplastique : extraire les PHA du cytoplasme des bactéries [fig.3]. Il faut d'abord séparer les bactéries de leur milieu de culture, par centrifugation ou filtration. Puis détruire la membrane de la cellule bactérienne pour en extraire les PHA. Pour cela, nous avons volontaire- >>>

***UN POLYESTER** est un polymère contenant des fonctions esters dans sa chaîne macromoléculaire. Ces fonctions sont susceptibles d'être hydrolysées amorçant ainsi le processus de dégradation.

Des déchets, des bactéries et des bioplastiques

>>> ment renoncé à la méthode classique en chimie, qui consiste à utiliser des solvants chlorés, chloroforme ou dichlorométhane, coûteux et nocifs pour l'environnement. D'autres méthodes ne présentent pas ces inconvénients. Par exemple, on peut éclater la cellule bactérienne par pression mécanique, recourir à des enzymes pour dégrader les parois bactériennes et libérer les granulés de PHA, ou encore utiliser des tensio-actifs*. Dans notre laboratoire, nous avons recours à une combinaison de ces procédés dont le détail reste confidentiel. Les granulés de PHA obtenus pourront servir ensuite à la production de produits en plastique, par exemple des sacs ou d'autres emballages.

En fin de vie, les PHA présentent un autre intérêt, leur biodégradabilité. En effet, le processus de polymérisation est réversible sous l'action d'une enzyme, la PHA dépolymérase, excrétée par les mêmes bactéries à l'origine de production des PHA. Ces bactéries sont donc capables de dégrader le PHA lorsqu'on les met au régime afin d'en récupérer les nutriments et l'énergie nécessaires à leur survie. En fait, un nombre important de bactéries et de champignons peuvent dégrader les PHA en présence ou non d'oxygène. La cinétique et le taux de biodégradation dépendent de nombreux facteurs, dont la population microbienne, le taux d'humidité, la température, la présence d'oxygène, l'acidité du milieu mais également le type de PHA.

Plastique biodégradable à 90 %. Ainsi, dans notre laboratoire, nous avons validé qu'un certain type de PHA est particulièrement biodégradable en milieu naturel marin. Nous avons réalisé un test de biodégradation dans un liquide à 25 °C composé d'eau de mer et de sable. Résultat : ce PHA a été dégradé à plus de 90 % après 220 jours. Par comparaison, la principale matière des végétaux, la cellulose, qui fait référence en la matière, n'est dégradée qu'à 50 % dans le même milieu.

*UN TENSIO-ACTIF est un agent chimique capable de modifier la tension superficielle entre deux surfaces.

La très forte biodégradabilité de ce PHA offre une perspective intéressante à l'heure où l'on cherche à limiter la pollution des mers et des océans par les emballages en plastique. En effet, depuis 1997, année de la découverte par l'explorateur américain Charles Moore d'un premier « *continent de plastique* » dans l'océan Pacifique, de nombreuses expéditions ont mis en évidence la prolifération dramatique de ces déchets dans tous les océans du monde. Les conséquences sont désastreuses pour la faune et la flore marines, d'autant que la dégradation des plastiques traditionnels peut prendre plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines d'années. Étant particulièrement concernés par ces problèmes de pollution maritime, nous nous sommes associés en 2014 à l'expédition de la goélette *Tara* en Méditerranée dans l'objectif d'évaluer et de caractériser la pollution au plastique sur cette mer fermée.

Désormais, notre laboratoire travaille à l'industrialisation de la production de PHA (lire « Vers une filière industrielle biosourcée en Bretagne », ci-dessous). Il existe un grand nombre de substrats et de bactéries possibles. On peut donc générer avec les PHA une large palette de polyesters aux propriétés mécaniques et physico-chimiques variées, notamment en termes de souplesse ou de rigidité. De telles qualités ouvrent la voie à des marchés de masse : emballages, produits d'hygiène jetables (rasoirs, brosses à dents, etc.). Même si pour l'instant, les prix de fabrication élevés des PHA les réservent aux marchés des niches à forte valeur ajoutée : biomédical, impression 3D ou électronique.

Cependant, nous pensons que l'utilisation de ressources exclusivement renouvelables, les avancées technologiques pour développer des procédés industriels « propres » et la biodégradabilité feront des PHA des bioplastiques de choix dans un futur proche. ■

Vers une filière industrielle biosourcée en Bretagne

Depuis 2010, les collectivités locales des régions Bretagne et Pays de Loire ont soutenu financièrement deux projets successifs, Biocomba puis Phapack. Objectif : mettre au point un procédé de fabrication par des bactéries marines d'un polyester de la famille des polyhydroxyalcanoates (PHA). Ces projets sont conduits par trois laboratoires académiques : le laboratoire de génie des matériaux de Bretagne, l'École nationale supérieure de chimie de Rennes et le laboratoire de génie des procédés, environnement, agroalimentaire de l'université de Nantes. De plus, un consortium industriel local a été fédéré autour du projet. Il regroupe les fournisseurs de déchets Séché Environnement et Triballat, le producteur d'emballage Europlastiques et le formulateur en plasturgie Cap Ouest. Enfin, ces projets sont animés par le réseau des industriels de l'emballage en Bretagne Breizpack et labellisés par le pôle de compétitivité Valorial. L'objectif final est de développer une filière industrielle pour la réalisation d'emballages en PHA pour l'agroalimentaire. Les premiers résultats ont déjà permis de développer un procédé de fabrication durable et respectueux de l'environnement qui n'utilise pas de solvants pour extraire les PHA des bactéries. Il s'agit désormais de mettre au point un protocole industriel pour produire des emballages à base de PHA.

Pour en savoir plus

> *Les Dossiers de la Recherche*, août 2012, p. 83.
> **http://tinyurl.com/limatb-bioplastique**
> **http://people.univ-ubs.fr/stephane.bruzaud**

ABONNEZ-VOUS À La Recherche

Et recevez en cadeau
2 Dossiers de La Recherche
sélectionnés par la rédaction

Addictions

Alcool, tabac, cannabis, jeux d'argent, internet… Ce numéro des Dossiers de La Recherche explique comment naissent les addictions et fait le point sur les avancées qui permettent d'envisager de nouvelles méthodes de soin, avec ou sans médicament.

Les origines de la vie

A quoi ressemblaient nos premiers ancêtres ? Comment ont-ils émergé et se sont-ils développés sur la Terre primitive ? C'est en conjuguant des recherches que les scientifiques convergent vers une meilleure compréhension des origines de la vie.

Choisissez le 4 x sans frais

15€50

Simple ! Pratique ! Sans contraintes !

1 an : 62€ au lieu de ~~76,80€~~

soit 20% de réduction !

BULLETIN D'ABONNEMENT

À retourner sous envelope affranchie à La Recherche - Service Abonnements - 4, rue de Mouchy - 60438 Noailles cedex

PLRC499

OUI, je souhaite m'abonner à La Recherche et recevoir en cadeau les 2 Dossiers de La Recherche :

Les origines de la vie (N°2) **+ Les Addictions** (N°6)

☐ **1 AN - 12 NUMÉROS** au prix de **62€** au lieu de ~~76,80€~~* soit près de **15€ d'économie.**

Je profite de l'option **4 fois sans frais** et je règle dès maintenant par chèque ou CB mon premier paiement, soit :

☐ **15,50€** pour **1 AN - 12 NUMÉROS.**

Puis je recevrai par courrier l'autorisation de prélèvement qui me permettra de régler les trois autres versements par prélèvement automatique trimestriel.

*Je peux acquérir séparément les numéros normaux au prix de 6,40€.

Service abonnements : ✆ France : 01 55 56 71 15 - ✆ Etranger : 00 33 155 56 71 15
E-mail : abo.recherche@biwing.fr
Sophia Publications - 74, avenue du Maine - 75014 Paris - SA au capital de 9 115 568 € - 562 029 223 RCS Paris

Offre réservée à la France métropolitaine valable jusqu'au 31/07/2015 dans la limite des stocks disponibles. Loi informatique et libertés : vous disposez d'un droit d'accès et de rectification des informations vous concernant. Elles pourront être cédées à des organismes extérieurs sauf si vous cochez cette case ❑.

J'indique ci-dessous mes coordonnées :

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Code Postal : |_|_|_|_|_|

Ville : _____

Téléphone : |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

Si vous souhaitez recevoir des offres de notre part, merci de nous indiquer votre e-mail :

_____@_____

Je règle à l'ordre de La Recherche par :

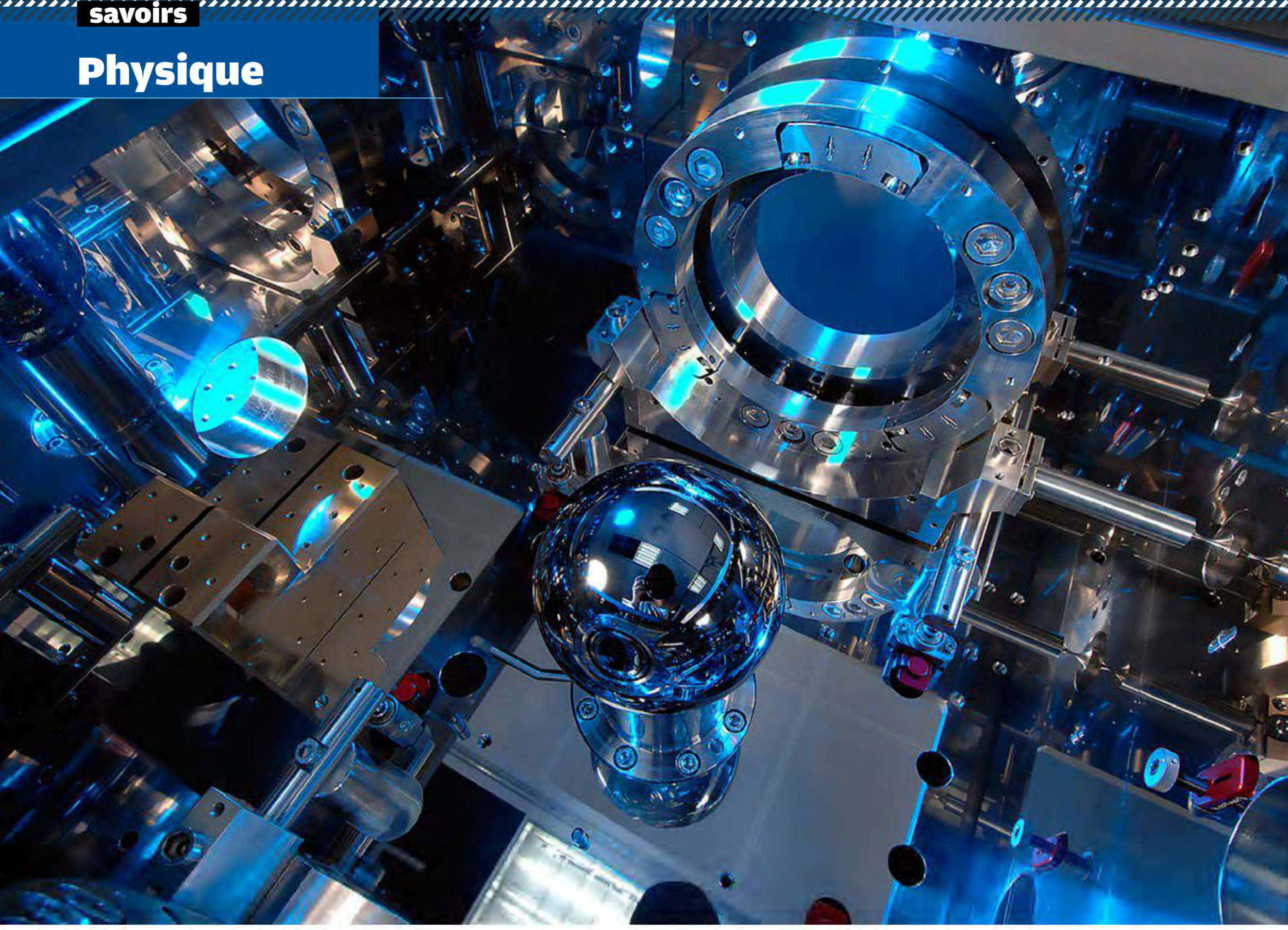
☐ Par chèque ☐ Par carte bancaire

Numéro CB : |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_|

Notez aussi les 3 derniers chiffres du numéro inscrit au dos de votre carte bancaire, au niveau de la signature : |_|_|_|

Expire fin : |_|_| |_|_|

Signature obligatoire



Unités de mesure cherchent étalon

Kilogramme, ampère, mole et kelvin vont être révisés prochainement. Ces unités ne vont pas changer d'ordre de grandeur, mais de point de référence. Explications.

PAR **Vincent Glavieux,**
journaliste.

Une révolution se prépare dans le domaine des unités de mesure. En novembre dernier, la Conférence générale des poids et mesures, qui rassemble tous les quatre ans à Paris les métrologistes du monde entier, a adopté une résolution capitale : la révision de quatre unités en 2018, lors de son prochain rassemblement. Sont concernés le kilogramme, unité de masse, le kelvin, unité de température thermodynamique, l'ampère, unité du courant électrique, et la mole, unité de quantité de substance. Quatre unités parmi d'autres qui, elles, n'ont pas besoin d'être révisées.

Pourquoi un tel changement est-il nécessaire ? Parce que les connaissances scientifiques et technologiques ont considérablement augmenté depuis quelques dizaines d'années. Au point de créer un immense décalage entre ces unités, dont la définition remonte aux années 1970, et les besoins de la science moderne en matière de précision de mesure. Une direction s'est imposée : redéfinir ces unités en les reliant à la valeur numérique de constantes

La mesure ultraprécise des caractéristiques physiques de cette sphère de silicium (au centre) est une expérience alternative à celle des balances du watt pour redéfinir le kilogramme.

Le kilogramme : en finir avec les variations de masse

fondamentales de la physique. Des constantes qui n'ont pas été choisies au hasard : il s'agit de grandeurs avec lesquelles les unités ont un lien au sein d'équations.

Dans un premier temps, les métrologistes doivent déterminer, avec une précision suffisante, la valeur de chaque constante. Il subsiste en effet un flou au-delà de quelques chiffres après la virgule. Cette incertitude est dérisoire aux yeux du commun des mortels, mais elle est trop grande pour les scientifiques.

Ce travail mobilise de nombreuses équipes aux États-Unis, en Europe, en Chine, en Nouvelle-Zélande, etc. Il implique de mettre au point des expériences dans lesquelles les physiciens mesurent les constantes de manière extrêmement fine (et où ces constantes sont comparées aux unités auxquelles on veut les relier). Plusieurs expériences au protocole différent doivent en outre être mises en place : la valeur numérique d'une constante ne peut être validée que si elle est obtenue par différentes méthodes. Tour d'horizon des travaux en cours et des évolutions à venir. ■

L'essentiel

> LES QUATRE UNITÉS DE MESURE FONDAMENTALES (kilogramme, ampère, mole et kelvin), définies dans les années 1970, sont en décalage avec les besoins de la science moderne.

> LA DÉFINITION de chaque unité sera reliée à la valeur numérique exacte d'une constante physique fondamentale.

> CE CHANGEMENT, qui devrait être approuvé en 2018, aura un impact positif pour l'industrie.

> Quelle est la définition actuelle ?

À peine 4 centimètres de haut pour 4 centimètres de diamètre : ce sont les dimensions du cylindre de platine (90 %) et d'iridium (10 %) qui sert d'étalon pour la définition du kilogramme depuis 1889. Ce prototype est conservé sous trois cloches de verre, et entreposé dans un coffre-fort, au sous-sol d'un pavillon, à Sèvres, dans les Hauts-de-Seine. Chaque pays signataire de la Convention du mètre, en 1875, en possède une copie. Il en existe une centaine en tout (plus six qui sont entreposées avec le prototype). Leur seule différence avec le prototype est qu'elles ne possèdent pas strictement la même masse. Un comble pour des étalons du kilogramme, direz-vous ? En fait, le prototype international, par définition, a une masse exacte d'un kilogramme. Les autres sont comparés avec lui et se sont vu attribuer une masse, dont l'écart est en général de quelques dizaines de microgrammes.

> Pourquoi cette définition n'est-elle plus satisfaisante ?

Le hic, c'est que cet écart a varié au fil du temps. Effet de l'usure, impact de la pollution et de la poussière, variations de température et d'humidité : les métrologistes eux-mêmes ne connaissent pas très bien la raison. *« Depuis sa création, le prototype n'a été utilisé que trois fois pour faire des mesures comparatives avec ses copies et, à chaque fois, on a constaté que la différence de masse augmentait. Il y a une dérive, faible, dont la valeur moyenne est de 50 microgrammes depuis 1889 »*, raconte Philippe Richard, président du Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées et responsable du Comité international des poids et mesures (CIPM) pour toutes les questions liées à la redéfinition du kilogramme.

Aussi minimes soient-elles, ces variations engendrent des difficultés : *« Il se pourrait que ce ne soit pas seulement la masse du prototype qui varie, mais aussi celle de ses copies*, reprend le physicien. *Or cette dérive-là, nous ne pouvons pas la quantifier, puisque toutes nos mesures sont relatives les unes aux autres. »* La conséquence pourrait être grande : *« La calibration de tous les instruments du monde est faite par rapport à l'étalon du kilogramme ou à l'une de ses copies, leur dérive pourrait entraîner, à terme, une modification de l'ensemble de l'échelle des masses. »* Cela aurait également des conséquences pour la définition de plusieurs unités auxquelles le kilogramme est relié, par exemple la pression (exprimée en pascal).

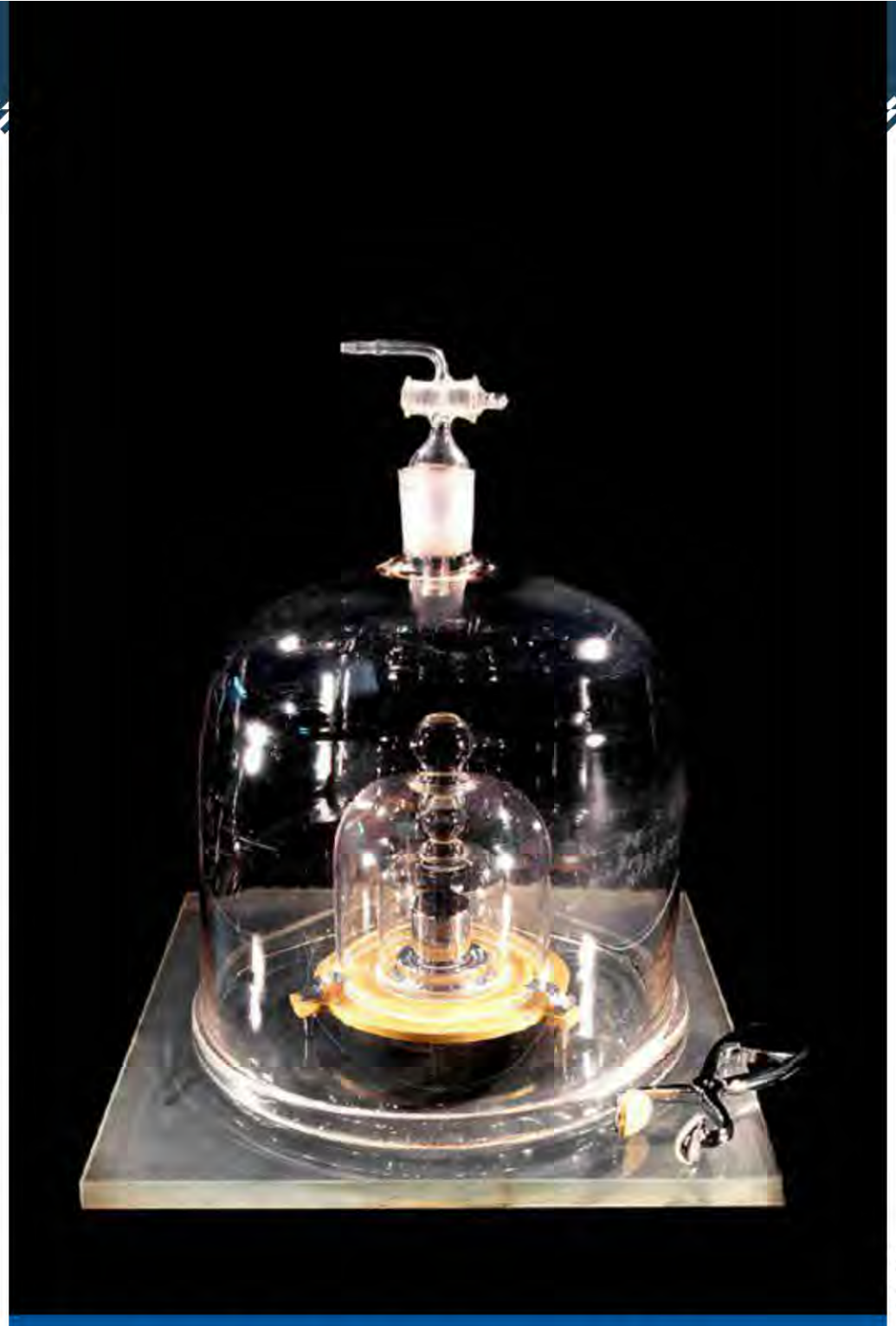
Par ailleurs, cet étalon pose un problème de principe : le kilogramme est la seule unité de base du système international reliée à un objet matérialisé. *« L'objet est unique, il n'est donc disponible qu'à un seul endroit en même temps*, explique Philippe Richard. *Et s'il est endommagé, détruit ou volé, il n'y aura plus de référent. »*

> Comment propose-t-on de le redéfinir ?

Toutes ces raisons ont poussé les métrologistes à chercher une méthode absolue pour quantifier le kilogramme. Elle permettrait d'identifier une éventuelle dérive en parallèle de l'ensemble des copies. Elle permettrait aussi, quand c'est nécessaire, de recaler l'ensemble du système des masses au niveau juste. Différentes voies sont à l'étude. La plus prometteuse consiste à relier le kilogramme, unité de masse, à la constante de Planck. »»»

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT (PTB), BRAUNSCHWEIG/ NATIONALES METROLOGIEINSTITUT

Unités de mesure cherchent étalon



© BIPM

Le cylindre de platine et d'iridium, qui sert d'étalon au kilogramme depuis 1889, est conservé précieusement sous trois cloches de verre, dans un coffre-fort.

»» Pour comprendre le lien entre les deux, il faut examiner certaines équations fondamentales de la physique moderne. La première est la formule d'Einstein $E = mc^2$, où « E » représente l'énergie, « m » la masse et « c » la vitesse de la lumière. La seconde, $E = h\nu$, a été introduite par Max Planck, en 1900. Ici, « E » représente l'énergie, « ν » la fréquence d'une particule et « h » la constante de Planck.

L'équation d'Einstein révèle que la masse peut être quantifiée en termes d'énergie. Celle de Planck montre que l'inverse est également vrai : moyennant quelques substitutions mathématiques, la fréquence d'une particule peut être remplacée par sa masse ; l'énergie est alors équivalente à la masse d'une particule multipliée par un certain nombre de fois la constante de Planck. Et si l'on prend les deux équations ensemble, on constate que la masse – donc le kilogramme – est liée à la constante de Planck.

Reste à fixer la valeur de cette constante avec un niveau de précision satisfaisant. Pour cela, les physiciens ont imaginé diverses expériences. La plus connue est la balance du watt. « *Il existe cinq expériences de balance du watt à travers le monde : une au Canada, une aux États-Unis, une en Suisse et deux à Paris – l'une est au Laboratoire national de métrologie et d'essais, et l'autre est en construction au Bureau international des poids et mesures* », énumère Philippe Richard. Il y a de fortes variations dans la construction de ces balances, mais toutes fonctionnent sur le même principe général.

Le dispositif ressemble à une balance classique à fléau : sur l'un des bras se trouve une bobine de courant électrique dans un champ magnétique. Sur l'autre bras, se trouve une masse équivalente au kilogramme étalon qui est soumise à la pesanteur. L'idée est d'équilibrer les deux bras. Pour cela, les physiciens jouent sur la puissance électrique qui traverse la bobine. Or cette puissance électrique fait intervenir, dans ses équations, la constante de Planck. Équilibrer les deux bras conduit donc à mesurer une valeur numérique fixe de la constante de Planck. Cela demande aussi d'établir une relation directe entre la valeur de cette constante et la masse d'un kilogramme, par le biais d'une équation.

À l'heure actuelle, la balance du watt canadienne détient la mesure la plus fine de la constante de Planck : elle trouve une valeur de 6,626 06X* × 10^{-34} joule par seconde, avec un degré d'incertitude légèrement inférieur à 2 × 10^{-8}. Ce résultat demande à être un peu amélioré et confirmé par d'autres expériences. Mais il laisse penser que l'objectif de 2 × 10^{-8} devrait être atteint d'ici peu. ■

Le litre vaut bien un « L »

L'abréviation des unités de mesure obéit à des règles strictes : celles qui portent le nom d'un inventeur sont abrégées par une lettre en majuscule (l'ampère devient « A », par exemple), les autres par leur initiale en minuscule. Le litre appartient à la seconde catégorie. Sauf que, comme le raconte Didier Chirat dans *Quand la science s'égare* [1], le « l » pose un problème typographique : il ressemble trop au chiffre « 1 ». À la fin des années 1970, la Conférence générale des poids et mesures étudie donc la possibilité de substituer le « L » au « l », d'autant qu'un physicien canadien, Kenneth Woolner, de l'université de Waterloo, aurait trouvé la trace, en faisant des recherches historiques, d'un certain Claude-Émile Jean-Baptiste Litre. Ce Français aurait, au XVIIIe siècle, standardisé le volume des éprouvettes. La démonstration est tellement vraisemblable que des médias s'en font l'écho. La Conférence générale, elle, n'est pas dupe et met au jour le canular. Ce qui ne l'empêche pas, en 1979, d'autoriser, dans un souci typographique et « à titre exceptionnel », l'abréviation « L ».

[1] Didier Chirat, *Quand la science s'égare*, La librairie Vuibert, 2015, 224 p., 14,90 €.

* **LE « X »** à la fin d'un nombre signifie que la valeur du dernier chiffre n'a pas encore été approuvée.

L'ampère : établir le lien entre courant et charge

› Quelle est la définition actuelle ?

« *L'ampère est l'intensité d'un courant constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie* [...] *et placés à une distance d'un mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force égale à* 2×10^{-7} *newton par mètre de longueur* » [1]. Cela signifie que, si on injecte un ampère dans chacun de ces fils conducteurs, la force magnétique entre les deux possède une valeur de 2×10^{-7} newton par mètre de longueur.

› Pourquoi cette définition n'est-elle plus satisfaisante ?

Parce que cette méthode est irréalisable ! On n'arrive pas à obtenir une mesure avec le niveau de précision que l'on s'est fixé, résume Michael Stock, directeur du département électricité du Bureau international des poids et mesures (BIPM). Pour cette raison, les laboratoires nationaux de métrologie utilisent d'autres approches. « *Elles reposent sur des étalons quantiques, connus sous le nom d'effet Hall quantique et d'effet Josephson,* explique le physicien. *Mais, là encore, il est impossible d'obtenir une mesure suffisamment précise.* »

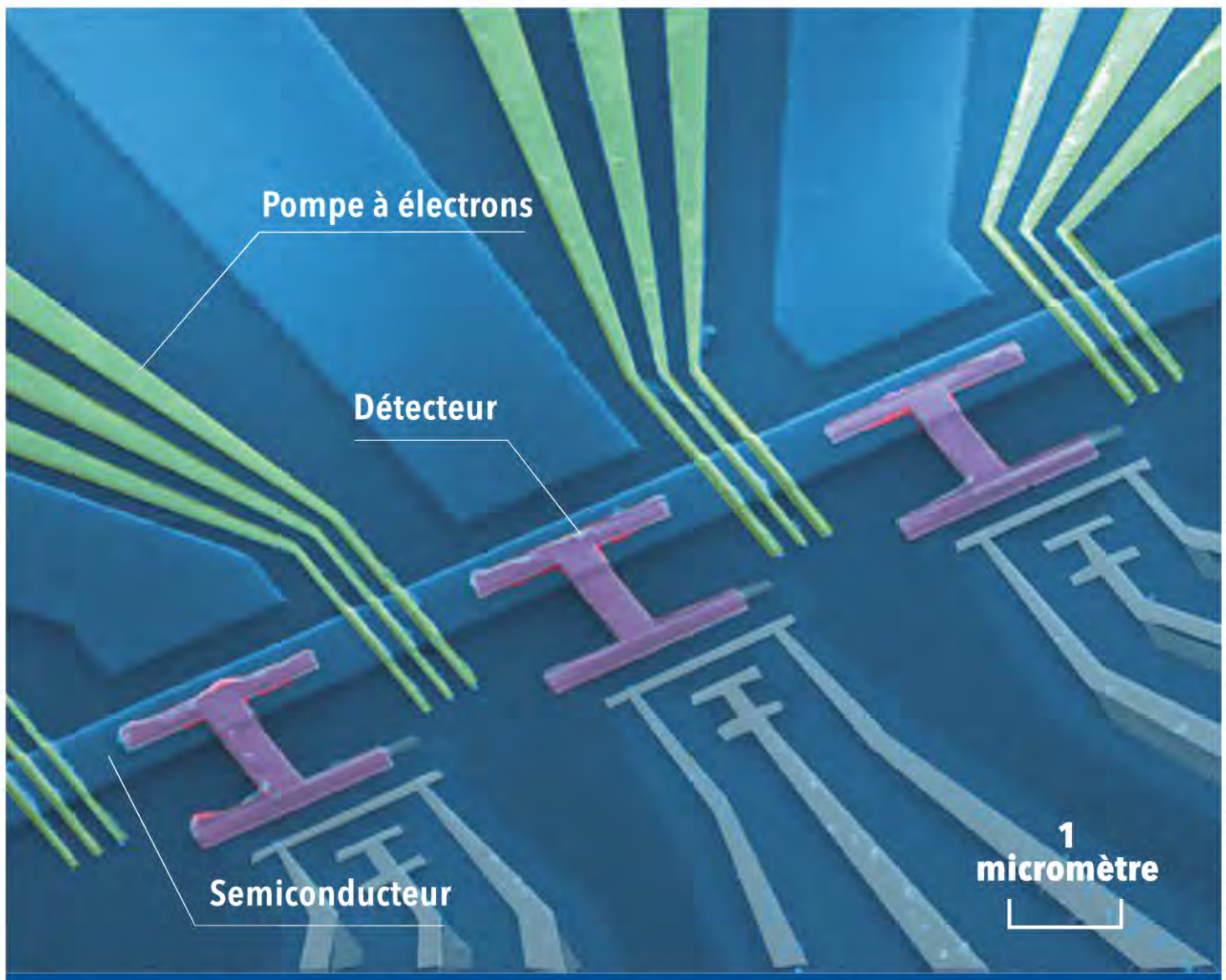
› Comment propose-t-on de le redéfinir ?

La solution imaginée est de définir l'ampère en se basant sur la charge de l'électron. Un choix logique. Le courant électrique (en ampère) correspond à la charge électrique (en coulomb) qui traverse un conducteur en une seconde. Dans un conducteur métallique, le courant est transporté par des électrons qui traversent ce conducteur. Pour définir l'ampère, il faut donc fixer le nombre d'électrons traversant le conducteur chaque seconde. Et surtout déterminer, avec suffisamment de précision, la charge correspondant à chaque électron. Pour l'instant, cette charge est fixée à 1,602 17X* × 10^{-19} coulomb.

Quelle expérience permettrait d'améliorer cette mesure et d'établir un lien entre courant électrique et charge de l'électron ? C'est le cas, selon Michael Stock, de l'effet Hall quantique et de l'effet Josephson. « *L'effet Hall quantique permet de réaliser une résistance électrique en se fondant sur la charge de l'électron et la constante de Planck. L'effet Josephson, lui, permet de réaliser une tension électrique en s'appuyant sur les deux mêmes constantes,* détaille le métrologiste. *En combinant les deux, on peut réaliser un courant électrique et ainsi déduire la charge de l'électron.* » Cette technique nécessite néanmoins de déterminer avec une exactitude suffisante la constante de Planck. « *C'est l'obstacle principal,* reconnaît-il. *Mais il semble probable que nous y parviendrons d'ici à 2018.* »

Une autre option est d'émettre, dans un conducteur métallique, un nombre d'électrons par seconde aussi faible que possible. Cette technique faciliterait la mesure ultraprécise d'un courant électrique d'un ampère et, par conséquent, de la charge de chaque électron. « *Cette technique est en développement mais n'est pas encore au point* », admet Michael Stock.

Un dispositif présenté en 2014 par un laboratoire de l'institut allemand de métrologie semble en tout cas prometteur. Il se compose d'un semiconducteur, sur lequel sont disposées des pompes à électrons. Ces pompes émettent quelques douzaines d'électrons par seconde. Des détecteurs, qui relient les pompes entre elles, mesurent le courant engendré. Et le rythme est suffisamment lent pour que les physiciens allemands atteignent une précision de l'ordre de 10^{-18} ampère [2]. ■



Le semiconducteur est traversé par des pompes à électrons (en vert) qui émettent quelques douzaines d'électrons par seconde. Elles sont reliées par des détecteurs (en violet) qui mesurent le courant engendré par la circulation des électrons. Leur précision est de l'ordre de 10^{-18} ampères.

© PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT (PTB), BRAUNSCHWEIG/ NATIONALES METROLOGIEINSTITUT

La mole : la différencier du kilogramme

› Quelle est la définition actuelle ?

La mole est peut-être la moins connue des unités de base en cours de révision. Elle correspond à *« la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0,012 kilogramme de carbone-12 »*. Pour le dire autrement, une mole d'atomes de carbone-12 possède une masse de 12 grammes, qui correspond à un nombre fixe d'atomes de carbone-12. Par extension, une mole correspond à un nombre fixe d'atomes, d'ions, d'électrons, etc. ; sa masse varie selon l'entité élémentaire chimique (eau, fer, cuivre, aluminium, etc.) choisie.

› Pourquoi cette définition n'est-elle plus satisfaisante ?

La définition de la mole est intimement liée à celle du kilogramme. Or les problèmes que pose la présente définition, instable, du kilogramme sont connus (lire « Le kilogramme : en finir avec les variations de masses », p. 63). Le Comité international des poids et mesures (CIPM) souhaite donc rendre la définition de la mole indépendante de celle du kilogramme. Pour cette raison et aussi pour mettre en évidence la distinction entre les grandeurs « quantité de matière » et « masse », trop souvent confondues.

› Comment propose-t-on de la redéfinir ?

Il a ainsi été proposé de lier la définition de la mole à la valeur numérique de la constante d'Avogadro. Ce qui est le cas depuis plus d'un siècle ! *« Les deux notions sont liées depuis les travaux du physico-chimiste français Jean Perrin, en 1909,* confirme Bernd Güttler, responsable du groupe de travail sur la révision de la mole pour le CIPM. *Il a montré que la constante d'Avogadro représente le nombre d'atomes, de molécules ou d'autres particules dans une mole de n'importe quelle substance. »* Les premières mesures de cette constante ont eu lieu dans les années 1970 : des physiciens allemands ont utilisé un cristal de silicium et, à l'aide de rayons X, y ont compté le nombre d'atomes. Depuis, les résultats ont beaucoup progressé et on arrive aujourd'hui à une valeur de 6,022 14X* × 10^{23} par mole. Le niveau d'incertitude est de 3 × 10^{-8}, tout proche de l'objectif qui est de 2 × 10^{-8} [3]. ■

La sphère de silicium pour redéfinir la mole (à gauche) est bien plus petite que celle utilisée pour le kilogramme (à droite).

© PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT (PTB), BRAUNSCHWEIG/ NATIONALES METROLOGIEINSTITUT

Un impact positif pour l'industrie

« SI TOUTES LES CONDITIONS SONT REMPLIES, la redéfinition des quatre unités sera approuvée en 2018, lors de la prochaine Conférence générale des poids et mesures. Et nous espérons que les nouvelles unités auront à la fois aucun et beaucoup d'impact ! Aucun impact, car nous choisirons les nouvelles définitions de telle sorte que les gens n'aient pas besoin, par exemple, de recalibrer leurs balances. Mais nous espérons en même temps que ces définitions auront un impact immense, en particulier dans l'industrie. Prenons l'exemple du kilogramme. L'industrie pharmaceutique aura peut-être besoin, dans le futur, de développer des balances qui seront plus précises dans le domaine du milligramme, voire du microgramme. Il y a deux raisons à cela. Premièrement, c'est important pour la fabrication de leurs médicaments : mettre au point un médicament requiert un pesage aussi précis que possible des différents éléments qui le composent, afin que le produit final ne soit pas dangereux pour les patients. Secondement, et de manière plus pragmatique,

Joachim Ullrich physicien
- dirige l'institut Max-Planck de physique nucléaire, à Heidelberg, depuis 2001
- préside l'Institut allemand de métrologie depuis 2012
- préside la Commission de conseil sur les unités pour le comité international des poids et mesures depuis 2014

© BIPM

Le kelvin : associer température et énergie

> Quelle est la définition actuelle ?

Le kelvin est « *la fraction 1/273,16 de la température thermodynamique du point triple de l'eau* » [4]. Ce point triple correspond à la température à laquelle l'eau coexiste dans ses trois états : liquide, solide et gazeux.

> Pourquoi cette définition n'est-elle plus satisfaisante ?

La définition du kelvin s'appuie sur une propriété de l'eau. Mais, comme le reconnaît le Bureau international des poids et mesures, cette propriété « *dépend dans la pratique de la pureté et de la composition isotopique de l'eau utilisée* » [5]. La définition du kelvin, comme celle du kilogramme, est donc fondée sur un point de référence instable.

> Comment propose-t-on de le redéfinir ?

Le comité consultatif pour la thermométrie propose de faire coïncider la définition du kelvin avec la valeur numérique de la constante de Boltzmann. Celle-ci a été introduite par le physicien autrichien du XIXe siècle, Ludwig Boltzmann. Elle fait le lien entre la température d'un système physique (en kelvin) et son énergie propre (en joule) – celle-ci correspondant aux mouvements et aux interactions des particules qui le constituent.

La valeur numérique de cette constante repose sur une expérience unique, menée en 1988. Cette expérience consistait à mesurer la vitesse de propagation du son dans un nuage d'argon, gaz rare (comme l'hélium). La vitesse de propagation du son dépend en effet de la masse moléculaire du gaz, de sa température et de la constante de Boltzmann. L'expérience aboutit à estimer cette constante à environ $1{,}3806488 \times 10^{-23}$ joule par kelvin, avec une incertitude d'environ 1×10^{-6}.

Les métrologistes doivent maintenant obtenir une estimation du même ordre, à l'aide d'une autre méthode, pour fixer une valeur définitive de la constante de Boltzmann. L'expérience qui détermine le comportement d'un milieu gazeux soumis à un champ électrique donné semble prometteuse. « *On devrait atteindre, cette année ou l'année prochaine, pour ce type d'expérience, une mesure avec une incertitude d'environ* 2×10^{-6} », confirme Joachim Ullrich, président de la Commission de conseil sur les unités pour le Comité international des poids et mesures. Un résultat « satisfaisant », qui ouvrirait la voie à la redéfinition du kelvin. ■

[1] www.bipm.org/fr/publications/si-brochure
[2] L. Fricke *et al., Phys. Rev. Lett., 112,* 226803, 2014.
[3] B. Andreas *et al., Phys. Rev. Lett., 106,* 030801, 2011.
[4] www.bipm.org/en/CGPM/db/10
[5] www.bipm.org/fr/CGPM/db/24/1

Pour en savoir plus

> http://www.bipm.org/
Le site internet du Bureau international des poids et mesures (BIPM).

c'est important pour réduire leurs coûts : certains des éléments qu'ils utilisent dans les médicaments coûtent très cher, or ils n'en ont parfois besoin qu'en très petites quantités. Avoir une balance ultraprécise leur permet de s'assurer qu'ils n'achètent que les quantités dont ils ont réellement besoin. Sur la base de notre nouvelle définition du kilogramme, nous espérons qu'ils pourront développer des balances de ce type, et améliorer leur précision par la suite, quand ils en auront besoin.

LE KILOGRAMME EST DONC CLAIREMENT L'UNITÉ dont la révision est la plus pressante. La raison en est simple : c'est la dernière unité dont la définition dépend d'un objet matérialisé, dont la masse, selon nos mesures, a varié au cours du temps. Définir le kilogramme en le reliant à la valeur numérique exacte d'une constante physique, comme la constante de Planck, assurera donc sa stabilité à long terme et par là même sa fiabilité.
Dans cette optique, les expériences internationales menées au Canada, aux États-Unis, etc., font des progrès. Nous sommes confiants sur le fait que, d'ici à un an ou un an et demi, elles atteindront les niveaux d'exigence du Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées, fixés à un niveau d'incertitude de 2×10^{-8}. Nous sommes tout aussi confiants à propos de l'ampère, du kelvin et de la mole. Tous nos efforts sont en tout cas consacrés à ce que l'ensemble de ces travaux expérimentaux soit soumis pour publication avant le 1er juillet 2017, afin d'être pris en compte dans nos réflexions. »

■ **Propos recueillis par Vincent Glavieux**

Portrait

de Monsieur Aimant

« Le prix Nobel de un peu le mien »

Pierre Védrine est né en 1964. Diplômé des Arts et Métiers et titulaire d'un DEA, il effectue une thèse à Grenoble, au Centre de recherche sur les très basses températures du CNRS, où il conçoit un alternateur supraconducteur. Il intègre ensuite le CEA où il travaille sur la conception d'aimants pour le LHC (Large Hadron Collider, ou Grand Collisionneur de hadrons, en français) ou le Neurospin. En 2014, il est nommé chef du service des accélérateurs, de cryogénie et de magnétisme du CEA.

Ingénieur de recherche, Pierre Védrine s'est révélé un excellent chef de projet, menant à bien la conception d'aimants supraconducteurs de l'accélérateur du Cern ou de la plus puissante machine IRM du monde.

« *J'ai construit une partie de l'instrument qui a permis de découvrir le boson de Higgs… vous imaginez ?* » Dans la voix de Pierre Védrine, il n'y a pas de prétention. Juste de la joie, de la surprise presque. Il met son clignotant et s'engage sur le parking du Centre à l'énergie atomique (CEA), à Saclay. « *De fait, ce Prix Nobel de physique – celui remis en 2013 aux théoriciens belge et britannique François Englert et Peter Higgs – c'est un peu le mien.* » L'ingénieur de recherche sourit et gare sa voiture comme d'autres amarrent leur bateau : en utilisant l'inertie du véhicule.

À l'écouter, il ne s'y est pas pris autrement pour conduire sa vie professionnelle : « *Je n'ai jamais eu de plan de carrière* », ce qui ne l'a pas empêché de gravir les échelons et d'être nommé en 2014 chef du service des accélérateurs, de cryogénie et de magnétisme du CEA. Une promotion obtenue après quelques faits d'armes, comme la conception d'aimants supraconducteurs pour le Cern ou pour la plus puissante des machines IRM du monde.

Né en 1964 à Paris dans une famille d'ingénieurs chimistes, l'adolescent aime les sciences et la « bricole ». Il s'imagine un temps chirurgien militaire mais opte pour une classe préparatoire, « *pour garder le plus grand éventail de possibilités* ». Il ne s'estime pas assez bon élève pour devenir physicien théoricien, alors il s'oriente vers l'ingénierie, entre aux Arts et Métiers et poursuit avec un DEA lié à la physique des grands instruments. Et fait son stage au Joint European Torus, chambre de confinement magnétique destinée à étudier la fusion nucléaire et située près d'Oxford, au Royaume-Uni.

Le moment où l'aimant a atteint les 20 500 ampères est le plus fort de sa carrière

Au seuil de la thèse, il hésite entre les États-Unis et la France mais se décide pour Grenoble, pour sa femme qu'il épouse en 1988 et avec laquelle il aura quatre enfants. Il intègre alors le Centre de recherche sur les très basses températures du CNRS où il participe au développement d'une machine électrique capable de produire un courant alternatif sans déperdition d'énergie : le premier alternateur supraconducteur du monde. « *À l'époque, EDF s'imaginait que la puissance des réacteurs nucléaires allait croître et dépasser les capacités des alternateurs classiques.* »

Il explique : un alternateur est composé d'un aimant mobile qui, à l'instar d'une dynamo de vélo, tourne à l'intérieur d'un bobinage fixe et génère un courant alternatif. Traditionnellement, cet aimant est constitué d'une bobine de cuivre, un bon conducteur, mais qui, au-delà d'une certaine intensité de courant, chauffe, dissipe trop d'énergie et voit son rendement chuter. D'où l'idée de remplacer ce cuivre par un alliage de niobium titane, un matériau dit « supraconducteur », parce qu'à 4,2 kelvins, il transporte l'électricité sans déperdition d'énergie. « *J'ai donc conçu un système capable de faire tourner à 3 000 tours minute, dans un bain ultrafroid d'hélium liquide, une bobine d'un mètre de long et constitué d'un fil nanométrique de niobium titane long de plusieurs kilomètres.* » À son expression, on devine que la réalisation de cette tâche est aussi difficile qu'il y paraît.

Au terme de sa thèse, un prototype d'alternateur supraconducteur voit le jour. Le concept n'ira toutefois pas plus loin, la course à la puissance n'étant finalement pas aussi rentable que l'avait

physique 2013, c'est

© PHOTOS BERTRAND DESPREZ

envisagé EDF. Il n'empêche, *« il s'agissait d'une première mondiale. »* Ou plutôt de la première des premières mondiales de Pierre Védrine. Car à peine diplômé, en 1990, il est recruté par le CEA pour travailler sur la conception de certains des aimants supraconducteurs nécessaires au fonctionnement du Grand Collisionneur de hadrons (LHC), le futur accélérateur du Cern.

Accélérateurs de particules. *« Dans ces grands instruments, les particules sont accélérées et contrôlées par une myriade d'aimants. »* Autour du LHC, plus de 1 000 dipôles, faits de deux bobines générant un champ magnétique vertical, courbent la trajectoire des protons, et près de 400 quadripôles, constitués de quatre bobines, agissent comme des lentilles magnétiques, permettant de focaliser ou de défocaliser le faisceau de particules. Depuis les années 1960, le CEA fabriquait des aimants quadripolaires, notamment pour des accélérateurs comme Hera en Allemagne. Pour le LHC, il s'agissait de produire des aimants capables de générer des champs magnétiques deux fois plus puissants : plus de 8 teslas. *« Ce chiffre correspond à un optimum entre les performances visées, le diamètre de l'accélérateur, la puissance des aimants et le prix de l'installation. »* À savoir 3 à 4 milliards d'euros pour le LHC.

Après avoir aidé à développer des quadripôles efficaces, en 1999, il se voit confier la finalisation de l'aimant dit « toroïdal » d'Atlas, le détecteur qui devait découvrir le boson de Higgs en 2012. À la suite des premiers concepteurs, Antoine Dael, du CEA, avait imaginé le prototype à une plus petite échelle. Pierre Védrine serait celui qui mettrait au monde les huit aimants constitutifs du détecteur, des géants de 25 mètres de long et composés d'un fil de niobium titane de 30 kilomètres. *« La taille de cet aimant a été l'un des plus grands défis à surmonter. »* Sans parler de l'orchestration >>>

C'est en se laissant porter par sa curiosité que Pierre Védrine est devenu un spécialiste des aimants. Ce qui l'a amené à conduire des projets qu'il compare à des « mini-Airbus ».

Portrait *de Monsieur Aimant*

Pierre Védrine

Son laboratoire

Le service des accélérateurs, de cryogénie et de magnétisme du CEA se trouve sur le plateau de Saclay. Il appartient à l'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers. Cent quarante personnes, ingénieurs et techniciens y développent des aimants supraconducteurs, des sources ou des accélérateurs de particules. Ils effectuent aussi des tests cryogéniques sur des aimants fabriqués à l'étranger.

Ses publications

P. Tixador, Y. Brunet, P. Vedrine *et al.*, *IEEE Trans. Mag*, *2256*, 27, 1991.
P. Védrine *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond., 235, 9, 1999.
P. Védrine *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond., 504*, 16, 2006.
P. Védrine *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond., 24*, 2014.

>>> du projet : « *Les Italiens usinaient les bobines, les Espagnols des parties en acier inoxydable tandis que des pièces en titane étaient façonnées en Russie et en Biélorussie. D'un point de vue logistique, il s'agissait d'un mini-Airbus. Il m'a fallu avaler quelques couleuvres sans jamais céder sur l'essentiel et ce pendant des années.* » À ce petit jeu, l'ingénieur se révèle doué : « *Il sait écouter les idées des autres, trancher quand il le faut et assumer les conséquences des décisions prises* », résume Thierry Schild, l'un de ses collaborateurs.

En septembre 2005, les huit plus grands aimants du monde sont agencés 100 mètres sous terre, dans la caverne. Quelques mois plus tard, lorsque l'aimant atteint pour la première fois les 20 500 ampères, Pierre Védrine vit le moment le plus fort de sa carrière, « *celui qui devait sanctionner des années de travail* ». Un succès qui ne sera pas le dernier. Pour preuve, la suite de la visite.

D'un pas léger, Pierre Védrine entre dans les locaux flambant neufs de Neurospin. Un dédale de couloirs, puis, derrière une porte, une énorme cavité cylindrique qui accueillera, d'ici à la fin de l'année, la plus puissante machine IRM du monde, conçue pour sonder des arcanes encore inconnus du cerveau humain. Pierre Védrine y travaille depuis 2005. Pourtant, là où certains confrères n'hésitent pas à clamer et réclamer la paternité de l'instrument, lui en parle avec humilité.

Il travaille à la machine conçue pour sonder les arcanes encore inconnus du cerveau humain

Apprivoiser d'autres matériaux. « *Dans toutes les machines IRM, il y a un aimant supraconducteur qui génère un champ magnétique particulièrement uniforme.* » Dans un hôpital, ce dernier est de 1,5 à 3 teslas. Il passe à 7, voire 9,4 teslas dans les laboratoires de recherche, ce qui permet d'accroître la qualité des images obtenues. « *Notre objectif avec le projet Iseult est d'atteindre les 11,7 teslas.* » Denis Le Bihan, physicien neurochirurgien au CEA à l'origine de cette idée, s'en explique : « *Des expériences menées sur des animaux ont montré qu'à de tels niveaux de champs magnétiques, il y avait un réel saut qualitatif dans la résolution ou le contraste des images.* » Le hic, c'est qu'à de telles intensités, les chercheurs tutoient les limites physiques de l'alliage niobium titane qui ne peut produire un champ magnétique supérieur à 12 teslas. Il aura fallu dix années de travail et plus de 40 millions d'euros pour lever tous les verrous techniques, comme celui lié à l'obtention d'un champ magnétique homogène à plus d'un millionième.

Chef de service depuis 2014, il gère désormais 140 personnes et une cinquantaine de projets. Son boulot ? Définir la stratégie générale de ses équipes. « *Pour les aimants supraconducteurs, nous sommes arrivés au terme d'un cycle d'exploitation du niobium titane. Il faut démarrer une nouvelle phase de recherche pour apprivoiser d'autres matériaux et anticiper les besoins des dix à vingt prochaines années.* » La particularité de sa discipline, explique-t-il, c'est qu'elle avance au travers de projets très onéreux et très longs à développer. L'avantage, c'est qu'une fois la machine lancée, les équipes peuvent se concentrer sur leurs travaux pendant des années sans trop se soucier de l'aspect financier. « *Par rapport aux autres chercheurs qui cherchent en permanence des financements, c'est un atout de taille : on vit dans un autre univers.* »

Pour l'avenir, il évoque le successeur du LHC, le Future Circular Collider (FCC), un accélérateur long de 100 kilomètres (contre 27 pour le LHC) dont les aimants devraient atteindre les 16 teslas, soit des champs magnétiques bien supérieurs à ceux envisageables avec un alliage niobium titane. « *La préétude de cet instrument doit être rendue fin 2018, mais rien ne dit que le FCC sera construit.* » Avec un coût estimé de 20 milliards d'euros, ce projet international ne verra le jour que si de nouvelles questions de physique sont soulevées avec le LHC. « *Ce qui n'est pas encore gagné puisque le boson de Higgs a "malheureusement" été découvert exactement comme on l'imaginait.* »

Tel est le paradoxe du triptyque de la physique, « *formé par les théoriciens, les expérimentateurs et l'instrument.* » Il parle d'instrument, non des personnes. Et quand on lui demande le nom des ingénieurs qui, comme lui, le fabriquent, il sèche. Ce que Guy Aubert, professeur émérite à l'université de Poitiers, comprend sans peine : « *Avant, les expérimentateurs créaient leurs propres instruments, mais quand ceux-ci sont devenus trop complexes ou onéreux, une cohorte de physiciens-ingénieurs spécialisés a émergé.* » Ainsi, 2 000 à 3 000 ingénieurs et techniciens ont travaillé sur la conception des détecteurs du LHC.

Une armée de l'ombre pas toujours reconnue à sa juste valeur. « *Et pourtant, sans nous, les physiciens sont aveugles. Galilée aurait-il découvert ses lunes sans lunette ?* » Et Peter Higgs aurait-il confirmé l'existence de sa particule sans les aimants de Pierre Védrine ? La question est ouverte. ■

Viviane Thivent

Le Monde
LA Recherche

PRÉSENTENT

FORUM

SCIENCE, RECHERCHE & SOCIÉTÉ

7e édition

DÉBATS
RENCONTRES
EXPO · FILM

ENTRÉE LIBRE

csuper.fr

#ForumSRS

PROGRAMME ET INSCRIPTION **SUR WWW.FORUM-SRS.COM**

En partenariat avec

MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE, DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE · ADEME · INRA · INSTITUT NATIONAL DU CANCER · Inserm · irstea · METEO FRANCE

Avec le soutien de :

orange · RENAULT · TOTAL · le cnam · arte FUTURE · France Inter

FORUM
SCIENCE, RECHERCHE & SOCIÉTÉ

UN ÉVÉNEMENT Le Monde ET La Recherche

PROGRAMME DE LA JOURNÉE

9H30-11H

CONFÉRENCE PLÉNIÈRE
La technologie va-t-elle changer la nature humaine ?

AVEC

- LAURENT ALEXANDRE, président de DNA Vision
- PR FRANÇOIS BERGER, neuro-oncologue, responsable d'équipe de recherche Inserm, directeur Clinatec
- JEAN-MICHEL BESNIER, philosophe
- NICOLAS DEMASSIEUX, directeur d'Orange Labs Recherche

Suivez le live-tweet avec #ForumSRS en partenariat avec Indesciences

indesciences.com

11H15-12H30

TABLES RONDES
9 milliards d'habitants en 2050, comment nourrir la planète ?

AVEC

- MICHEL GRIFFON, président de l'Association internationale pour une agriculture écologiquement intensive (AEI)
- FRANÇOIS HOULLIER, président de l'Inra (Institut national de la recherche agronomique)
- ANTOINE HUBERT, cofondateur et président de la société Ynsect
- BARBARA REDLINGSHÖFER, chargée d'étude à l'Inra / Mission d'anticipation Recherche / Société & Développement durable

L'avenir du paiement dématérialisé

AVEC

- EMMANUEL MAYER, responsable du domaine de recherche « Trust & Data Services », Orange
- PIERRE PARADINAS, professeur titulaire de la chaire système embarqués, Cnam

Cancer : quelle part de hasard ?

AVEC

- ÉDOUARD HANNEZO, biophysicien à l'Institut Curie, chercheur à l'université de Cambridge, spécialiste de la modélisation mathématique en biologie
- FRANÇOIS SIGAUX, directeur du pôle Recherche et Innovation de l'Institut national du cancer (INCa)
- ANNIE THÉBAUD-MONY, sociologue, directrice de recherche à l'Inserm, chercheuse associée au Groupement d'intérêt scientifique sur les cancers professionnels (Giscop 93) à l'université Paris XIII

Gestion et partage de la ressource en eau à l'horizon 2050

AVEC

- FRANCK GALLAND, géopolitologue spécialiste des conflits hydriques et directeur de la société Environnemental Emergency & Security Service
- THOMAS PELTE, expert outils et prospectives, Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse
- ÉRIC SAUQUET, chercheur hydrologue Irstea, Lyon-Villeurbanne

12H30-13H30

DOCUMENTAIRE SCIENTIFIQUE
Climatosceptiques : La Guerre du climat

France - 2014 - 52'
Réalisateurs : Laure Noualhat et Franck Guérin
Production :
Compagnie des Phares et Balises

Une investigation au cœur du lobby climatosceptique. Comment est-on parvenu à rendre médiatiquement acceptable ce qui est scientifiquement faux ?

en partenariat avec
Pariscience
festival international du film scientifique

EXPOSITION
Notre planète océan

Une trentaine de panneaux pour comprendre en chiffres et en images les liens fondamentaux entre océan et climat.

© FRANCIS LATREILLE

POUR S'INSCRIRE : WWW.FORUM-SRS.COM

JEUDI 28 MAI 2015 AU CNAM

13H45-15H15

CONFÉRENCE PLÉNIÈRE
La France face au défi climatique

Restitution du sondage exclusif Ipsos-*Le Monde*-*La Recherche*-MENESR : « Les Français et le climat »

AVEC
- HERVÉ DOUVILLE, météorologue, Météo-France
- HERVÉ LE TREUT, climatologue, Institut Pierre-Simon-Laplace
- JEAN-FRANÇOIS MINSTER, directeur scientifique, Total
- AUTRES INTERVENANTS
  À découvrir sur www.forum-srs.com

15H30-16H45

REMISE DES PRIX DU CONCOURS GÉNÉRATION DÉVELOPPEMENT DURABLE

en présence de Najat Vallaud-Belkacem, ministre de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche

(sous réserve)

TABLES RONDES
Épidémie planétaire : un enjeu pour la recherche ?

AVEC
- DR CAROLINE CARBONNELLE, directrice adjointe du Laboratoire P4 - Inserm Jean-Mérieux, Lyon
- BERNADETTE MURGUE (Inserm), directeur adjoint de l'Institut de microbiologie et des maladies infectieuses (Immi)
- YAZDAN YAZDANPANAH, chef du service des Maladies infectieuses et tropicales de l'hôpital Bichat, Paris

Quelle voiture dans dix ans ?

AVEC
- RÉMI BASTIEN, directeur de la Recherche et de l'Innovation du groupe Renault
- SOPHIE GARRIGOU, responsable de programme Véhicule du futur, direction des Investissements d'avenir, Ademe
- FAWZI NASHASHIBI, directeur de l'équipe Robotique et Systèmes de Transports Intelligents, Inria Paris-Rocquencourt

La vie ailleurs, dans notre galaxie ?

AVEC
- DR LOUIS LE SERGEANT D'HENDECOURT, directeur de recherche Astrochimie et origines – Institut d'astrophysique spatiale, CNRS-UPS
- NICOLAS PRANTZOS, directeur de recherche, CNRS, Institut d'astrophysique de Paris
- AUTRES INTERVENANTS
  À découvrir sur www.forum-srs.com

17H-18H15

TABLES RONDES
Préhistoire : le passé reconstitué

AVEC
- ALAIN BÉNÉTEAU, paléontographiste
- BRUNO MAUREILLE, directeur de recherche au CNRS, directeur de l'UMR 5199 PACEA
- AUTRES INTERVENANTS
  À découvrir sur www.forum-srs.com

Les dangers du trading à la vitesse de la lumière

AVEC
- JEAN-ÉDOUARD COLLIARD, professeur de finances à HEC
- ALEXANDRE LAUMONIER, étudiant en anthropologie à l'EHESS
- SOPHIE MOINAS, professeure de finances, université Toulouse 1 (TSE)
- STÉPHANE TYC, cofondateur de McKay Brothers, LLC

Les écrans : enjeu sanitaire ?

AVEC
- PR DAPHNÉ BAVELIER, professeure de sciences cognitives
- MICHEL DESMURGET, directeur de recherche en neurosciences
- SABINE DUFLO, psychologue clinicienne
- BRUNO HARLÉ, pédopsychiatre

FORUM
SCIENCE, RECHERCHE & SOCIÉTÉ

UN ÉVÉNEMENT Le Monde ET La Recherche

LES CONFÉRENCES ET TABLES RONDES DE LA JOURNÉE

© SCIENCE PICTURE CO/SCIENCE PHOTO LIBRARY/COSMOS

LES FRANÇAIS FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Quelle est la perception des Français face au changement climatique ? Quelles sont leurs attentes ? Sont-ils prêts à changer leurs habitudes pour s'adapter ? Une enquête Ipsos fait le point sur leur opinion. Les scientifiques, eux, réaffirment la réalité du changement climatique. Cette alerte largement relayée fait son chemin dans l'esprit de nos contemporains. Mais à quel point ? Et à quels types de changement peut-on s'attendre ?

ÉPIDÉMIE PLANÉTAIRE : UN ENJEU POUR LA RECHERCHE ?

Alors que le virus Ebola vient de faire 10 000 victimes en Afrique de l'Ouest, rencontre avec ces chercheurs qui tentent de prendre les virus de vitesse.

Ebola, Chikungunya, H1N1… de nouvelles flambées épidémiques se multiplient sur la planète et mettent les chercheurs au défi. Ces derniers se retrouvent en première ligne et doivent être hyperréactifs. Objectif : développer les recherches pendant la fenêtre de l'épidémie pour tester des médicaments et des vaccins, bien sûr, mais aussi pour étudier les facteurs épidémiques, élaborer des outils diagnostiques plus performants, etc.

En France, cet effort de réactivité s'organise autour de l'Institut de microbiologie et des maladies infectieuses (Immi). Face à ces virus meurtriers qui se moquent des frontières et se propagent à une vitesse surprenante, la réactivité est donc vraiment le maître mot pour les virologues. Rencontre avec des acteurs aux manettes de cette véritable course contre la montre.

DEMAIN, L'HOMME AUGMENTÉ ?

De la guérison à l'amélioration de l'homme par des implants, il n'y a qu'un pas que certains aimeraient franchir. L'entreprise n'est-elle pas risquée ? Aujourd'hui, on peut implanter dans nos corps des dispositifs pour éviter la souffrance, atténuer les symptômes de maladies, voire restaurer certaines aptitudes. Demain, il serait possible de s'en servir pour améliorer nos performances physiques et intellectuelles. L'homme et la société n'en seraient-ils pas transformés, à tout jamais ?

QUELLE VOITURE DANS DIX ANS ?

La science-fiction nous promettait des voitures volantes, c'est finalement la puissance de calcul informatique à bord des véhicules qui s'est envolée. Limitateur de vitesse, correcteur de trajectoire, freinage d'urgence, détecteur de fatigue… la conduite des véhicules les plus modernes est déjà largement assistée par ordinateur. Et ce n'est que le début. Les constructeurs s'appliquent aussi à mettre au point des véhicules plus sobres et à développer des modes de propulsion moins polluants. À ces efforts viendra s'ajouter la généralisation de nouveaux usages comme le covoiturage et l'autopartage. Dans dix ans, il n'y a pas que nos automobiles qui auront changé, nos habitudes aussi.

LES DANGERS DU TRADING À LA VITESSE DE LA LUMIÈRE

Alors que les places de marché sont de plus en plus reliées par fibre optique et que l'ingénierie financière fait massivement appel aux machines et aux algorithmes, les mathématiques pourront-elles prévenir les risques de flash crashes ?

POUR S'INSCRIRE : WWW.FORUM-SRS.COM

JEUDI 28 MAI 2015 AU CNAM

PRÉHISTOIRE : LE PASSÉ RECONSTITUÉ

Des artistes donnent la main aux scientifiques pour faire revivre des mondes disparus. Comment travaillent-ils ? Autour des exemples de la grotte Chauvet, dont le fac-similé sera tout juste ouvert, des sculptures hyperréalistes de nos ancêtres par Élisabeth Daynès ou des dessins de dinosaures ou de requins préhistoriques réalisés par le « paléontographiste » Alain Bénéteau.

LES ÉCRANS : UN ENJEU SANITAIRE ?

Un nombre croissant d'études pointe le rôle de l'exposition aux écrans, notamment des plus jeunes, dans un certain nombre de pathologies. Un rapport récent de l'Académie des sciences a fait polémique en proposant une lecture assez partielle de la littérature scientifique disponible sur le sujet.

9 MILLIARDS D'HABITANTS EN 2050 : COMMENT NOURRIR LA PLANÈTE ?

Comment relever le défi en préservant la planète ? Pas de secrets, il faudra agir sur plusieurs fronts : produire plus pour faire face à la montée démographique ; produire mieux pour respecter l'environnement ; produire autrement pour s'adapter au changement climatique ; et produire autre chose dans un contexte de raréfaction de certaines ressources comme le pétrole. Comment trouver un juste milieu entre l'agriculture hyperintensive et l'agriculture biologique aux rendements trop aléatoires ?

L'AVENIR DU PAIEMENT DÉMATÉRIALISÉ

Payer sa baguette de pain avec son empreinte digitale, rembourser un ami en lui envoyant un simple e-mail, régler son billet de train à l'aide de son téléphone mobile… à l'avenir, il deviendra de plus en plus courant de dépenser son argent sans sortir son porte-monnaie, son chéquier ou sa carte bancaire. Dans notre monde ultraconnecté, les moyens de paiement évoluent.

© DENIS MEUNIER

© FOLOLIA.COM - OZPHOTOGUY

LA VIE AILLEURS, DANS NOTRE GALAXIE ?

Ces dernières années, l'astronomie a découvert que des systèmes solaires tels que le nôtre sont très banals dans la Voie lactée et que des milliards de planètes sont situées dans la « zone habitable » autour de leur étoile, là où la vie telle que nous la connaissons sur Terre a une chance d'apparaître. Comment évaluer la probabilité que des vies extraterrestres existent ?

CANCER : QUELLE PART DE HASARD ?

Grâce à des outils mathématiques permettant d'analyser de très grandes masses de données (big data), les chercheurs tentent de mieux comprendre les déterminants du cancer pour mieux le traiter. Tabac, alcool, amiante, génétique… divers facteurs sont aujourd'hui clairement identifiés comme augmentant le risque de cancers. Mais quelle est la part du hasard dans l'apparition de la maladie ? Récemment publiée dans la revue *Science* par des chercheurs à l'université américaine Johns-Hopkins, une étude relance le débat. Relayé par la presse internationale, son principal résultat suggère que deux tiers des cancers seraient dus à un « *manque de chance* » du patient… « *bad luck* », dans le texte.

GESTION ET PARTAGE DE LA RESSOURCE EN EAU À L'HORIZON DE 2050

Épuisement des ressources hydriques, réchauffement climatique, accroissement de la population… l'eau est un des enjeux mondiaux du XXIe siècle. Pour assurer un meilleur partage de cette ressource vitale, scientifiques, gestionnaires et politiques tentent d'améliorer sa gestion.

11e édition

CONCOURS GÉNÉRATION DÉVELOPPEMENT DURABLE

Inventer pour le monde de demain

www.concoursgenerationd2.com

Catsaï Design - IstockPhoto - Shutterstock

DÉCOUVREZ LES 3 LAURÉATS

à l'occasion du Forum Science, Recherche & Société

REMISE DES PRIX

JEUDI 28 MAI

À 15H30 AU CNAM, PARIS

Plus d'informations et inscriptions sur :
www.concoursgenerationd2.com

Un événement

La Recherche – L'actualité des sciences

Liberté • Égalité • Fraternité – République Française – Ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche

ADEME – Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie

Bouygues Immobilier

Groupe Caisse des Dépôts

Avec le soutien de

ANOUS PARIS

Dunod – Éditeur de savoirs

France Culture plus – le webcampus

Conférence des Grandes Écoles

Conférence des présidents d'université

l'Etudiant

REFERD

terraeco

idées

78 **L'entretien du mois**
avec Dominique Gombert
« Le bisphénol A suscite encore des controverses »
propos recueillis par Alain Perez

82 **Déchiffrage**
1300 mosquées et 50 000 églises en France
par Hervé Le Bras

86 **Histoire de science**
Des coquillages qui sèment la discorde
par Marie-Christine de La Souchère

91 **Les livres**
La sélection de la rédaction de La Recherche

96 **L'agenda**
Les conférences et les expositions

98 **Curiosités**
Les insolites de l'actualité scientifique

© ILLUSTRATION REMI MALINGREY

Perturbateurs endocriniens, le grand flou juridique

Cancer, obésité, troubles de la fertilité... Une étude scientifique vient de chiffrer à plus de 150 milliards d'euros par an les dégâts sanitaires induits par les perturbateurs endocriniens, en Europe. Face à un tel enjeu de santé publique, que fait la Commission européenne ? Elle s'était engagée à publier en décembre 2013 les critères de définition des perturbateurs endocriniens. On les attend toujours. Or, sans ces critères, impossible de réglementer ces substances présentes notamment dans les pesticides, les plastiques et les cosmétiques. En janvier, Bruxelles a certes divisé par onze le seuil de tolérance à la plus emblématique d'entre elles, le bisphénol A. Reste que le cadre juridique actuel n'est pas à la mesure des risques encourus.

Marie-Laure Théodule

L'entretien du mois

Interdit dans les contenants alimentaires en France depuis janvier, le bisphénol A divise les agence sanitaires. **Dominique Gombert,** *directeur de l'évaluation des risques à l'Anses, analyse ces divergences et revient sur la délicate évaluation des perturbateurs endocriniens.*

« Le bisphénol A suscite encore des controverses »

Dominique Gombert,
spécialiste des risques environnementaux, dirige depuis 2010, l'évaluation des risques à l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses). Auparavant, il a été directeur adjoint des risques chroniques à l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris).

LA RECHERCHE : L'Autorité européenne de sécurité des aliments (Efsa) a rendu publique le 17 janvier un avis sur les risques liés au bisphénol A. Partagez-vous son analyse ?

DOMINIQUE GOMBERT : Globalement, les conclusions de l'agence européenne ne sont pas si éloignées des nôtres. L'Efsa reconnaît enfin, comme l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses), un effet probable de cette molécule sur la structure de la glande mammaire. Mais les deux agences sont en désaccord sur le seuil d'exposition sans risque pour la santé. Jusqu'en 2015, l'Efsa affirmait que l'exposition du consommateur au bisphénol A était sans risque en deçà d'une dose journalière de 50 microgrammes (µg) par kilogramme corporel et par personne. Dans leur nouvel avis, les experts de l'Efsa ont divisé cette valeur par 11. Ils l'établissent à titre provisoire à 4 µg/j/kg. Cela démontre la nécessité de prendre en compte de nouvelles connaissances. Toutefois, l'Anses estime qu'il faut être encore plus protecteur. Nous préconisons en effet un seuil inférieur à 1 µg/j/kg. Nos deux agences divergent sur l'interprétation de la robustesse des études de toxicité disponibles. Et sur les décisions à prendre en matière de risque dans un contexte de forte incertitude scientifique et d'enjeux sanitaires importants.

De quel désaccord s'agit-il ?

D.G. : L'agence européenne estime qu'aucune étude sur l'effet du bisphénol A sur la glande mammaire n'est suffisamment solide pour lui permettre d'en évaluer les risques. Cette approche conduit l'Efsa à ne pas mettre en évidence de risque sanitaire associé à l'exposition au bisphénol A dans ce cas précis. L'Anses considère au contraire que les incertitudes qui pèsent sur ces études ne doivent pas dissuader d'évaluer les risques pour cet effet spécifique, en l'assortissant de toutes les réserves qui s'imposent. Ce qui nous a conduits à pointer un risque pour certains consommateurs et en milieu de travail.

Ces divergences sont assez subtiles et rendent la position des décideurs politiques très inconfortable pour réglementer l'usage du bisphénol A...

D.G. : Subtiles mais fondamentales. Il s'agit ici de prendre en compte des incertitudes en matière de sécurité sanitaire dans un contexte de connaissances en devenir. Du reste, nous ne sortirons que lentement de ces incertitudes : la preuve épidémiologique, indiscutable de l'effet du bisphénol A sur la population ne viendra pas avant plusieurs années. Peut-être trop tardivement...

Quand disposerons-nous d'une preuve irréfutable concernant les problèmes de contamination au bisphénol A *in utero* ?

D.G. : Dans quinze ans, nous saurons peut-être si nous étions dans le suspecté ou l'avéré. Il va en effet falloir suivre des femmes enceintes qui auraient été exposées au bisphénol A pendant leur grossesse, puis leurs enfants, avec toutes les difficultés que cela suppose dans la durée. Certains de ces travaux sont déjà en cours au niveau national.

Quels sont les risques sanitaires liés à l'exposition à ces produits très présents dans notre environnement ?

D.G. : Des perturbateurs endocriniens sont utilisés depuis près de quarante ans, comme hormone de synthèse (le distilbène), insecticide (le chlordécone) ou dans certains plastiques comme le bisphénol A. Parallèlement, nous assistons à une augmentation de pathologies qui directement ou indirectement peuvent être associées à >>>

© PHOTOS FRÉDÉRIQUE PLAS

L'entretien du mois

Dominique Gombert

« Le bisphénol A suscite encore des controverses »

>>> des interactions avec le système hormonal : trouble de la fertilité, cancers hormonaux-dépendants, troubles du métabolisme, diabète, obésité, troubles cognitifs... L'impact des perturbateurs endocriniens n'est donc pas une simple vue de l'esprit. Ce sujet est un enjeu majeur de santé publique, comme l'ont été les substances cancérigènes ou mutagènes. Cela fait environ vingt-cinq ans que de nombreuses agences sanitaires internationales se sont penchées sur ces questions. Mais établir des liens de cause à effet entre l'exposition à ces substances et des pathologies prendra encore des années. De plus, sur le plan international, on peine toujours à s'accorder sur la définition précise des perturbateurs endocriniens. On ne dispose donc pas de critères réglementaires permettant de les identifier et de les classer eu égard à leur niveau de dangerosité, ni de tests « normalisés » sur lesquels tout le monde s'accorde. Le cadre réglementaire est encore inadapté.

Comment une agence sanitaire comme l'Anses évalue-t-elle les risques d'une substance chimique de cette catégorie ?

D.G. : Les agences sanitaires travaillent à peu près toutes de la même façon, en analysant l'ensemble des données issues de la littérature scientifique. Le bisphénol A est vraisemblablement le perturbateur endocrinien qui donne lieu au plus grand nombre de publications. Les experts suivent une procédure classique. Ils dressent une liste de questions auxquelles ils cherchent des réponses dans les publications en appréciant le niveau de preuve disponible. Ces substances ont-elles des effets toxiques particuliers ? Dispose-t-on d'études épidémiologiques ? Comment la population est-elle exposée ? Quels sont les principaux vecteurs d'exposition : alimentation, air, eau... ?

Pourquoi ces experts n'arrivent-ils pas à se mettre d'accord, alors que les publications sont en principe les mêmes pour tout le monde ?

D.G. : Les divergences apparaissent parce que derrière la perturbation endocrinienne se profilent des questions nouvelles. Toutes les connaissances disponibles sur ces sujets sont produites en dehors de référentiels réglementaires normalisés et adaptés aux perturbateurs endocriniens. Elles sont produites par des scientifiques qui cherchent à résoudre des questionnements théoriques nouveaux et non pour satisfaire à des préoccupations réglementaires. Chaque substance potentiellement perturbatrice endocrinienne a de plus des effets toxiques particuliers qu'il convient d'étudier spécifiquement.

Comment mesurer les effets toxiques de cette famille de produits ?

D.G. : La toxicologie a longtemps été fondée sur le dogme établi au XVI[e] siècle par Paracelse selon lequel « c'est la dose qui fait le poison ». Un tel principe de linéarité associe l'effet toxique d'une substance à la quantité ingérée par l'organisme. Mais certains perturbateurs endocriniens ne « fonctionneraient » pas selon ce principe. Néanmoins, aucune étude scientifique n'a encore établi avec précision la relation entre les doses et les effets du bisphénol A. C'est pourquoi l'Anses n'a pas conclu sur ce point. Mais l'exposition à ce produit, même à de très faibles doses, pendant des moments de développement particuliers, semble bien poser un problème de santé publique.

L'étude des risques liés aux faibles doses exige-t-elle de rénover les méthodes d'investigation ?

D.G. : Absolument. Pendant longtemps, les agences sanitaires ont travaillé sur des problématiques « aiguës », une forte dose conduisant à des effets observables et immédiats. Une population donnée était exposée à un agent ou à une bactérie pathogène et tombait malade. Le lien de cause à effet était donc facile à établir. Avec les perturbateurs endocriniens, la situation est totalement différente. Les niveaux d'exposition sont très faibles et les substances sont multiples voire en mélange. Chacun peut être exposé sans que l'on sache toujours comment et à quel moment précis. La description des expositions de la population est donc un enjeu considérable et d'une complexité redoutable. Nous avons fait réaliser des mesures de taux de bisphénol A dans les aliments : dans la moitié des cas, l'exposition provient des contenants alimentaires. En revanche, dans près d'un quart des cas, on ne sait pas pourquoi on retrouve ces molécules dans certains aliments.

Faut-il réduire les usages du bisphénol A ?

D.G. : Oui. L'agence recommande la limitation des expositions de certaines populations. D'ailleurs, on peut s'en passer facilement pour différents usages. Ainsi, sa suppression dans les tickets de caisse ne paraît pas insurmontable. Pour le reste, il faut valider la faisabilité technologique et l'innocuité des substituts.

Ne craignez-vous pas que l'on vous reproche une application aveugle du principe de précaution ?

D.G. : Cette question s'adresse d'abord au gestionnaire et non au scientifique évaluateur de risque. Mais donnez-moi néanmoins des exemples d'application réelle du principe de

précaution en France, ayant conduit à la mise en œuvre de mesures de gestion proportionnées aux risques identifiés. Il faut rappeler aussi que la mise en œuvre de ce principe doit présenter un caractère révisable en fonction de l'acquisition de nouvelles connaissances.

Que va-t-il se passer maintenant ? Allez-vous trouver un terrain d'entente avec l'Efsa ?

D.G. : Les discussions continuent. C'est sur la base des données françaises que le bisphénol A a été classé dans la catégorie des substances suspectées d'être toxiques pour la reproduction par l'Union européenne. Les autorités européennes discutent actuellement pour savoir s'il faut limiter l'exposition de la population et des travailleurs aux papiers thermosensibles. Par ailleurs, c'est la Commission européenne elle-même qui a demandé l'interdiction du bisphénol A dans les biberons. Le Commissaire à la santé John Dalli avait salué à l'époque cette décision, la considérant comme un jalon important en faveur d'une meilleure protection de la santé des citoyens dans le respect du principe de précaution. Mais, en toute rigueur, il n'y a pas plus d'éléments de preuve pour interdire le bisphénol A dans les biberons que dans les autres contenants alimentaires.

Jusqu'où l'Anses peut-elle peser dans les décisions politiques ?

D.G. : Nous allons aussi loin que possible dans l'évaluation des risques avec comme préoccupation principale la santé publique. L'Anses assortit ses avis de toutes les réserves qui s'imposent au regard des incertitudes mais c'est le décideur qui décide, le cas échéant en intégrant d'autres paramètres que ceux qui relèvent de notre agence.

Donc, en ce qui vous concerne, ce dossier est loin d'être clos ?

D.G. : L'Anses va poursuivre son travail en prenant en compte toutes les connaissances nouvelles relatives aux dangers sanitaires. Les risques du bisphénol A doivent être évalués avec toutes leurs incertitudes, sans les passer sous silence, en les contextualisant et en les explicitant pour le décideur. Une chose que l'Efsa pourrait vraisemblablement faire plus.

Les seuils de tolérance qui sont actuellement en vigueur pourraient donc être revus à la baisse ?

D.G. : Bien sûr. L'Efsa elle-même souligne que ces valeurs sont temporaires. Ce qui sous-entend une vigilance et un réexamen continu de l'évaluation des risques. Le rythme de la production de nouvelles connaissances sur cette molécule, en Europe et en Amérique du Nord, est soutenu !

Lorsqu'ils travaillent sur un sujet de santé publique, comment les experts prennent-ils en compte leur responsabilité envers la société ?

D.G. : C'est une question fondamentale. Pour nous, le point important, c'est d'être conscient de la frontière : l'expert ne doit jamais se mettre dans l'état d'esprit du décideur politique. Il essaie d'établir la meilleure évaluation scientifique en fonction des connaissances disponibles et en pointant toutes les incertitudes. Mais il ne doit jamais s'obliger à conclure de façon raccourcie ou caricaturale, en endossant la responsabilité du décideur. De son côté, le décideur a toute la légitimité pour prendre en compte des facteurs qui sortent de la sphère de connaissance du chercheur comme les aspects de faisabilité technique réglementaire ou de contexte international. C'est lui qui décide dans quelle mesure le doute doit profiter au consommateur. Il est désigné pour cela et peut en rendre des comptes.

Peut-on renforcer les recherches sur la sécurité sanitaire dans un contexte de réduction des crédits de la recherche publique ?

D.G. : À l'Anses, nous appelons à la mise en place d'un fonds mutualisé qui serait utilisé par les agences européennes pour réaliser des études adaptées à nos objectifs. De fait, le corpus d'études scientifiques disponibles sur un sujet comme le bisphénol A n'a pas été construit pour faire une évaluation des risques au sens où les agences de sécurité sanitaire l'entendent ni pour aider les décideurs à prendre une décision. Pourtant, des études plus adaptées nous permettraient de lever les ambiguïtés. Aujourd'hui, nous restons tributaires des programmes de recherche. Or les questions d'expertise réglementaire n'intéressent pas beaucoup les chercheurs : ce n'est pas de la « belle » science ! Et c'est encore pire quand on demande la réplication d'une étude. Quel chercheur ou quel organisme peut être intéressé par la réplication d'un essai ? La production scientifique n'est ni organisée ni financée pour nous aider à répondre rapidement à ces défis de santé publique. Un tel fonds de mutualisation existe aux États-Unis mais pas en Europe. Souvent, nous sommes contraints d'attendre une publication scientifique pour réduire l'incertitude sur un risque sanitaire.

La preuve indiscutable de l'effet du bisphénol A viendra peut-être trop tardivement...

■ **Propos recueillis par Alain Perez**

Pour en savoir plus

> **http://tinyurl.com/efsa-bisphenol** L'avis de l'Efsa sur le bisphénol A.

> **www.anses.fr/fr/content/bisphénol-1** Le dossier de l'Anses sur le bisphénol A.

Déchiffrage

1300 mosquées et 50 000 églises en France

Même si, dans l'Hexagone, les catholiques sont bien plus nombreux que les musulmans, il y a beaucoup plus d'églises que de mosquées par nombre de croyants. La construction de mosquées n'a donc rien d'étonnant.

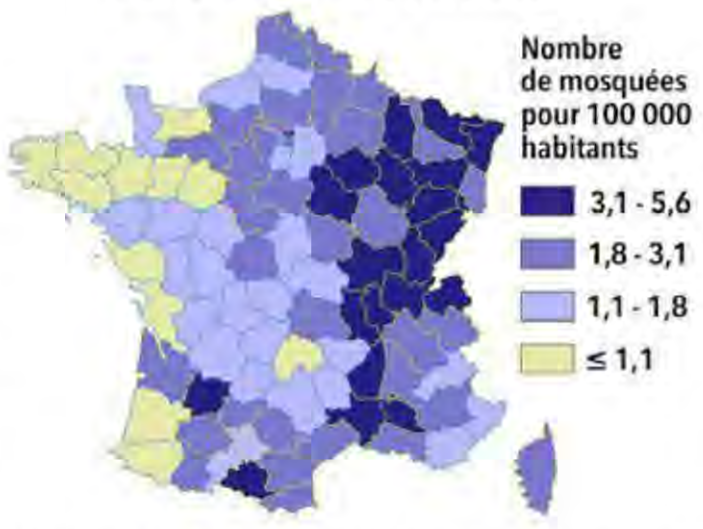
PAR **Hervé Le Bras,**
démographe, professeur à l'École des hautes études en sciences sociales.

L'économiste et démographe Alfred Sauvy avait coutume de mettre en garde l'usager des statistiques. Le chiffre est un être fragile, traitez-le avec précaution, disait-il. C'est particulièrement vrai pour des chiffres politiquement sensibles portant sur des éléments difficiles à définir et à mesurer. Le nombre de mosquées en France en est un bon exemple. Un site communautaire régulièrement mis à jour, celui du Guide musulman, fournit ainsi l'adresse de 1357 mosquées en France métropolitaine. Le ministère de l'Intérieur parle de 2052 lieux de culte musulmans, dont 90 mosquées, 350 en projet et le reste en salles de prière. Le site Wikipedia donne la commune et la date d'inauguration de 165 mosquées. Quel chiffre retenir et surtout quelle en est la signification ?

La cartographie peut aider à départager ces données. Comme les deux sites indiquent la localisation exacte des mosquées grâce à Google Maps, il est possible de représenter sur une carte le nombre de mosquées pour 100 000 habitants dans chaque département. La carte obtenue à partir du Guide musulman (voir ci-contre) correspond à celle de l'immigration maghrébine et turque en France. En revanche, la carte tracée à partir des données de Wikipedia est incohérente. À titre d'exemple, le Guide musulman dénombre 6 mosquées dans l'Allier, comme Wikipedia, mais 56 dans les Bouches-du-Rhône, alors que Wikipedia n'en cite que 7.

Retenons donc le chiffre du Guide musulman. Qu'il soit intermédiaire entre le nombre total de lieux de culte et celui des mosquées construites ou en construction n'est pas étonnant, car la frontière entre lieux de culte qui sont ou ne sont pas des mosquées est floue. Alors, 1357 mosquées, est-ce peu ou beaucoup ? Pour répondre, il faut des points de repère. Comparons donc le nombre de mosquées à celui des églises catholiques en activité. Notons que ce chiffre est difficile à obtenir avec précision, à cause de l'incertitude concernant la fréquence des messes. Si l'on extrapole à partir des données recensées par l'Observatoire du patrimoine religieux, on compte approximativement 65 000 églises en activité en France. Si l'on fait la même chose à partir des chiffres fournis par l'association Clochers de France, on en dénombre environ 50 000. En partant de ce dernier chiffre qui est le plus faible, le rapport du nombre de mosquées à celui des églises est de 1 à 37. Est-il proportionnel au nombre de musulmans et de catholiques ?

DENSITÉ DE MOSQUÉES



DANS L'EST DE LA FRANCE, le nombre de mosquées pour 100 000 habitants est plus élevé que dans l'Ouest.

SOURCE : WWW.GUIDEMUSULMAN.COM

Faible pratique religieuse. Une compilation de 55 000 questionnaires effectués en 2012 donne 3 % de musulmans dans la population âgée de plus de 18 ans et 47 % de catholiques (pratiquants ou non). Ramené aux 49 millions de personnes majeures sur le territoire métropolitain, cela donne 1,5 million de musulmans et 23,5 millions de catholiques, soit un rapport de 1 à 16. Il y a potentiellement moins de catholiques par église que de musulmans par mosquée. L'augmentation du nombre de mosquées – 20 inaugurations par an – n'a donc rien d'étonnant.

À ce rythme, il faudra soixante-dix ans pour que la proportion de croyants par lieu de culte soit la même dans les deux religions. Enfin, il ne faut pas redouter l'augmentation du nombre de mosquées, car on assiste à une convergence vers une faible pratique religieuse : selon la Sofres, les musulmans en France ne sont qu'un tiers à fréquenter régulièrement la mosquée et les catholiques un quart à assister régulièrement à la messe dominicale. ■

Cahier spécial réalisé avec le soutien de

COSMETIC VALLEY FRANCE

LVMH

La cosmétique relève le défi de l'innovation

La France est le leader mondial du secteur de la cosmétique. Son savoir-faire industriel est internationalement reconnu mais ses compétences en matière de recherche manquent de visibilité. Sous l'impulsion, entre autres, de Cosmetic Valley et du salon que le pôle de compétitivité organise à Paris à l'automne 2015, la situation pourrait évoluer.

Il aura fallu attendre 2015 pour qu'un salon international dédié à l'innovation cosmétique soit programmé en France. Un véritable paradoxe au regard de la position de leader qu'occupe le pays sur la scène internationale. La France, en effet, se distingue par son positionnement haut de gamme et par une image glamour portée par sa capitale. *« Notre savoir-faire industriel est indiscutable. Mais, pour conforter notre première place sur le marché mondial, nous devrons, à l'avenir plus que jamais, nous appuyer sur la recherche »*, annonce Christophe Masson, directeur scientifique de Cosmetic Valley. Car le marché de la cosmétique suscite bien des convoitises. Son potentiel de croissance est étonnant. Les habitants des pays émergents sont de plus en plus nombreux à se laisser séduire par les produits cosmétiques. Et globalement, les consommateurs disposent d'un budget de plus en plus important à consacrer à ce type de dépenses. Pour l'heure, ceux qui recherchent la qualité, la sécurité et la performance se tournent vers les produits *made in France* qui véhiculent des valeurs fortes. Mais beaucoup de pays font aujourd'hui le choix d'investir massivement dans la cosmétique pour développer leurs propres marques premium. La France doit donner de la visibilité à ses efforts en matière de R&D. Cette évolution du marché, Cosmetic Valley a su l'anticiper. *« Lorsque nous nous sommes lancés en 1994, nous étions dans une logique de cluster local. Nous voulions fédérer les forces et dynamiser le tissu des entreprises basées en Eure-et-Loir. Notre objectif était de développer nos affaires »*, explique Christophe Masson. Avec la labellisation pôle de compétitivité décrochée en 2005, Cosmetic Valley a changé de dimension. Sur le plan purement géographique d'abord, puisque le périmètre du pôle s'étend dès lors sur trois régions. Puis d'un point de vue stratégique, puisque le pôle a vocation, non seulement de faire le lien entre les entreprises mais également entre les entreprises et les organismes de recherche et de formation. Ainsi quelque 140 projets de collaboration entre acteurs privés et acteurs publics de la filière ont pu être menés en moins de 10 ans. Début 2015, le pôle a connu une nouvelle montée en puissance. L'Etat lui a en effet confié un rôle de coordinateur de l'écosystème national, avec pour objectif d'impulser en France une véritable politique de filière destinée à doper son efficacité et ses performances tout en accentuant sa visibilité. Des accords de collaboration ont d'ores et déjà été signés avec plusieurs régions dont l'Aquitaine et le Limousin et un rapprochement avec le pôle de compétitivité PASS, localisé en région Provence-Alpes-Côte-d'Azur est à l'étude.

Préparation d'un mélange de matières premières pour produit poudre.

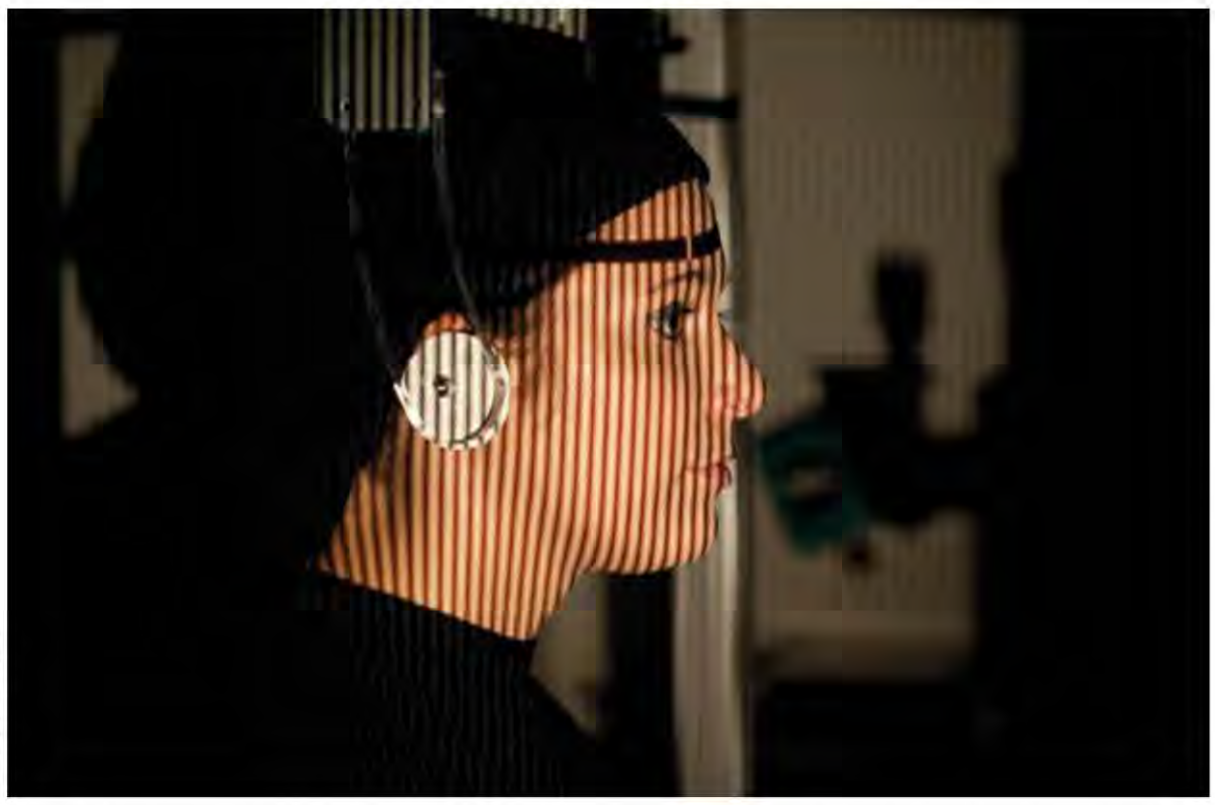
25 milliards
d'euros de chiffre d'affaires

150 000
emplois

Chiffres de la filière cosmétique française au 1er janvier 2015

Un salon international dédié à l'innovation

Le salon Cosmetic 360, qui se tiendra à Paris cet automne, est l'une des actions phares entreprises par Cosmetic Valley pour offrir de la visibilité à l'écosystème français de la cosmétique. *« L'innovation doit devenir une composante essentielle de l'attractivité de la marque France et de son image internationale. Car au-delà des valeurs d'élégance et d'excellence traditionnellement et culturellement liées à la parfumerie-cosmétique française, notre industrie, pour continuer à faire la course en tête, doit se*



SPINCONTROL

Mesure de l'efficacité d'un produit anti-âge par la méthode de projection de franges.

positionner très clairement sur le créneau de l'innovation », insiste Christophe Masson. Et le concept mis en œuvre sur ce salon souligne bien cette volonté. Il sera l'occasion, pour les exposants, issus de tous les métiers de la filière, de présenter leurs dernières innovations. Un service d'open innovation, basé sur une interface web et des espaces privatifs, permettra de rapprocher porteurs de projets et grands comptes ou entreprises de taille intermédiaires afin d'initier des collaborations. Enfin, un prix de l'innovation sera décerné à celle qui sera désignée par des jurys d'experts et de grands noms de la cosmétique comme la meilleure innovation mondiale de l'année. Le lauréat bénéficiera d'un accompagnement personnalisé de Cosmetic Valley et d'une dotation financière.

Parmi les autres actions entreprises depuis quelques années par le pôle de compétitivité pour remettre la France au cœur du marché mondial de la parfumerie-cosmétique et positionner résolument son industrie sur le créneau de l'innovation : la création de plusieurs plateformes destinées à devenir des lieux de rencontre et d'échange entre PME et universitaires. Un groupement de recherche lancé tout début 2015 fait quant à lui la preuve de la volonté de la recherche académique française de s'organiser pour répondre aux problématiques posées par les industriels de la cosmétique.

Les secrets de la beauté de demain

Tous les acteurs de l'écosystème semblent désormais prêts à répondre aux enjeux des principaux vecteurs du développement international de la filière. Premier signe de réussite de cette politique, le prix mondial de l'innovation décerné pour la première fois à un projet français à l'occasion du congrès IFSCC (International Federation of Societies of Cosmetic Chemists), en octobre 2014. Ce projet implique 2 PME (Alban Muller International et Payan Bertrand) et un laboratoire public (Université de Rouen) sur la problématique de l'allergie. Il propose de s'appuyer sur des protéines de maïs et sur leurs propriétés filmogènes non occlusives pour limiter le contact des extraits aromatiques avec la peau.

Et des collaborations se structurent désormais sur tous les maillons de la chaîne de valeur, du packaging fonctionnel (digital, antimicrobien, interactif associant LED et microprocesseurs, etc.) aux matières et aux actifs innovants (céramiques, matériaux biosourcés, molécules provenant de la cosmétopée, matières premières naturelles antimicrobiennes, actifs anti-pollution, etc.). Ou encore aux nouveaux outils de test et mesure (rhéologie acoustique sans contact, échographie haute résolution pour applications cosmétiques, objectivation ex-vivo, etc.) en passant par les nouveaux équipements de production (procédés en continu, impression 3 D, etc.) et bien sûr les nouveaux produits (bracelet connecté permettant de mesurer l'exposition au soleil, patch mesurant l'activité de la peau, cosmétiques sur mesure, beauté connectée, réalité augmentée, etc.).

Pour construire la beauté de demain, les collaborations se

Chiffres clés

- Le tissu industriel de la cosmétique est constitué à **80 % de PME**.
- **40 % de consommateurs** de produits cosmétiques en plus en 2030.
- **50 % des produits** qui seront sur le marché dans 5 ans n'ont pas encore été inventés.

Trois plateformes comme catalyseurs de l'innovation

La plateforme Cosmet'Up est le seul outil dédié à la filière cosmétique inscrit dans le cadre des investissements d'avenir. Elle a pour objectif d'accélérer l'innovation et d'apporter un support technique, des conseils et un hébergement moyen terme aux porteurs de projets.
Certesens est une plateforme pluridisciplinaire (sciences de l'ingénieur, neurosciences et sciences humaines et sociales) dédiée aux technologies de l'évaluation sensorielle. Elle offre un véritable référentiel des sensations indispensable à l'élaboration d'un nouveau produit.
La plateforme Cosmétomique a pour objectif d'aider les entreprises de la filière à comprendre la peau et ses interactions avec les produits en leur permettant d'accéder à des instruments de pointe.

La Cosmetic Valley, une référence de la cosmétique mondiale

Plus d'un produit cosmétique sur dix vendu dans le monde est fabriqué au cœur de la Cosmetic Valley
18 milliards d'euros de chiffre d'affaires annuel (25 milliards en France)
70 000 emplois (150 000 sur l'ensemble du territoire français)
3 régions impliquées : Centre, Haute-Normandie et Île-de-France
Près de 800 entreprises (78 % de PME, une quinzaine de grandes marques)
8 universités
CNRS
Soleil
200 laboratoires recherche publics
136 cursus de formation
Tous les métiers de la filière (matières premières et ingrédients, formulation, conditionnement, contrôles et tests, PLV, injection plastique, packaging, logistique, etc.)

concentrent sur les grands sujets de l'innovation cosmétique que sont la sécurité, les performances biologique et sensorielle et les services. La conservation des produits est ainsi un vecteur d'innovation fort. Parmi les pistes de réponse envisagées : le renforcement de l'effet protecteur du packaging ou la diminution de la sensibilité des produits aux micro-organismes. Du côté des performances biologiques, c'est notamment la compréhension des mécanismes impliqués dans le vieillissement de la peau qui focalise les efforts et les investissements. Car, avec l'ouverture de nouveaux marchés, une meilleure connaissance des différents types de peaux et de leurs réponses aux principes actifs semble indispensable. Le secteur de la parfumerie, quant à lui, s'intéresse tout particulièrement aux questions qui touchent à la sensorialité. Avec le développement de la micro fluidique, il devient, par exemple, possible d'imaginer des billes de parfum sans alcool à appliquer sur la peau. Dernier sujet qui enthousiasme autant les industriels que les consommateurs, celui de la beauté connectée. Les marques développent aujourd'hui essentiellement des applications smartphone ludiques et pratiques qui leur permettent de renforcer le lien avec leurs consommateurs. Un simulateur de maquillage en réalité augmentée grâce auquel les utilisatrices trouvent la couleur de fond de teint qui leur correspond, une application qui permet d'accorder son maquillage à sa tenue du jour et à son humeur. Et qui sait quelle innovation rendue possible demain par les progrès de la technologie.

COSMETIC360
INNOVATIONS & SOLUTIONS PARIS

Un salon dédié aux innovations de la filière parfumerie-cosmétique internationale
15 et 16 octobre 2015,
Carrousel du Louvre Paris
www.cosmetic-360. com

3 questions à Claire Elfakir

Cosmactifs, un Groupement de Recherche (GdR) consacré au secteur de la cosmétique, a été créé le 1er janvier 2015 par le CNRS (rattachement à l'Institut de Chimie et l'Institut de Sciences Biologiques). Il fédère 48 équipes réparties sur l'ensemble du territoire français. Claire Elfakir, chercheur à l'Institut de Chimie Organique et Analytique de l'Université d'Orléans et directeur du GdR, nous présente les enjeux qui entourent sa mise en place.

DR

Dans quel contexte le GdR Cosmactifs a-t-il été créé ?

Il est le résultat d'un triple constat. Tout d'abord, le secteur manquait d'instances capables de susciter et de structurer un débat scientifique, libéré des conflits d'intérêt industriels. Les universités engagées dans le comité d'expertise scientifique du pôle de compétitivité Cosmetic Valley, ensuite, regrettaient l'absence de projets communs entre des équipes de recherche travaillant sur des sujets d'intérêt pour la cosmétique. Enfin, la dynamique de recherche et d'innovation déjà initiée par les PME et les TPE de la filière avait besoin d'être intensifiée. L'objectif de ce GdR est d'encourager les coopérations pluridisciplinaires, que ce soit à l'échelle nationale ou européenne, entre chercheurs, industriels et organismes de R&D. Car c'est sur ce type de collaborations que portent aujourd'hui la plupart des appels à projets.

Quels sont les thématiques scientifiques qui seront abordées par les équipes de Cosmactifs ?

La mission principale du GdR est de favoriser l'avancée des connaissances dans des thématiques cosmétiques en lien avec les soins de la peau. Parmi les verrous déjà identifiés, on peut citer la valorisation de la biomasse végétale et le développement de nouvelles technologies vertes pour la production d'extraits ou l'extraction de molécules, la mise au point de formulations à l'efficacité et aux qualités organoleptiques accrues, le développement de méthodes alternatives à l'expérimentation animale ou l'élaboration de nouveaux modèles biologiques prenant en compte, par exemple, les différences de types de peaux (caucasienne, asiatique, etc.) ou encore l'étude de l'interaction contenant/contenu dans le packaging. Le GdR s'intéressera également à des thèmes émergents comme les possibilités de développement d'alternatives aux émulsions conventionnelles, l'identification de nouvelles cibles biologiques ou l'influence des polluants sur la microflore cutanée et les effets protecteurs des actifs cosmétiques.

Le salon Cosmetic 360 sera une belle vitrine pour le GdR…

Ce salon, en effet, est l'occasion pour nous d'afficher nos compétences et de donner de la visibilité à notre communauté. Nous espérons que notre présence sur Cosmetic 360 permettra aux industriels de nous identifier comme un véritable potentiel de recherche.

Réalisé avec le soutien de Cosmetic Valley - **Rédaction :** Nathalie Mayer - **Réalisation :** Carta-Link and Partners

Histoire de science

Comment des fossiles marins ont-ils pu être retrouvés sur la terre ferme, très loin de la mer ? De la Renaissance jusqu'au XVIII^e^ siècle, la question divise les scientifiques. Avant de brouiller Voltaire avec Buffon.

Des coquillages qui sèment la discorde

Marie-Christine de La Souchère,
agrégée de physique
mcsouchere@hotmail.com

Une simple histoire de coquillages est à l'origine d'une controverse scientifique qui a duré plus de deux siècles. En 1517, à Vérone, en Italie, des fouilles entreprises lors de la reconstruction des fortifications de la ville mettent au jour une multitude de pétrifications évoquant des animaux marins. Girolamo Fracastoro, médecin de son état, répond aux curieux, venus le questionner, que ces coquilles fossiles ont appartenu à des êtres vivants qui ont jadis vécu sur les lieux mêmes de leur découverte. Mais ses propos ne rencontrent aucun écho et les explications les plus saugrenues fleurissent quant à l'origine des objets exhumés.

Cent cinquante ans plus tard, en 1667, Nicolas Sténon, un Danois venu enseigner l'anatomie à Padoue, dissèque la tête d'un chien de mer, un requin de Méditerranée, pêché près de Livourne. Il note que ses dents sont identiques à ces fossiles aux allures de langues de serpents pétrifiées que l'on découvre dans les formations rocheuses de Toscane : les glossopètres. Sténon examine aussi les coquilles fossiles trouvées un peu partout en Italie et fait remarquer leur ressemblance avec des espèces existantes. Il les tient pour des dépouilles d'animaux marins et insiste sur leur origine organique dans des écrits largement diffusés.

Les explications les plus saugrenues fleurissent sur l'origine des objets exhumés en 1517

Les naturalistes anglais sont les premiers à réagir. Dans une lettre datée d'août 1671, le zoologiste Martin Lister exprime ses réticences. S'il admet que l'on puisse trouver, dans les pays méditerranéens, toutes sortes de coquilles marines incluses dans les roches, même à bonne distance de la mer, Lister affirme que les fossiles enfouis dans les carrières d'Angleterre ne sont que des simulacres de coquillages. En effet, leur texture ne diffère aucunement de celle de la roche qui les abrite. De plus, certains fossiles n'ont pas d'équivalent parmi les formes vivantes actuelles. Comme Dieu ne saurait avoir toléré l'extinction d'espèces qu'il a lui-même créées, Robert Plot, conservateur de l'Ashmolean Museum d'Oxford, se demande si ces « pierres figurées » ne sont pas dues à une force minéralisante, capable d'engendrer, *in situ* et sous l'effet du hasard, des formes particulières.

À l'opposé, son confrère John Woodward s'est rangé sous la bannière de Sténon, plaidant pour une origine naturelle et organique des fossiles, restes d'animaux antédiluviens. Selon lui, le Déluge, seule catastrophe susceptible d'avoir opéré un changement notable à la surface du globe, a dissous la masse des terres, à l'exception des coquilles et autres dépouilles résistantes d'êtres vivants. Mis en suspension dans l'eau, matériaux pulvérisés et organismes résistants se sont ensuite resédimentés de concert, par gravité. Les coquilles les plus lourdes et les pierres en bas, les coquilles les plus légères et la craie en haut. Et à ceux qui, comme Lister ou le botaniste John Ray, objectent que des fossiles comme les ammonites n'ont pas leur équivalent dans le monde qui les entoure, Woodward répond que l'on n'a pas exploré les dernières profondeurs des mers.

Le même Ray, troublé par la présence de coquilles fossiles loin de la mer, notamment en altitude, ne croit pas pour autant qu'elles ont été apportées par le Déluge. La faible durée de ce dernier, telle qu'indiquée dans la Bible, est de toute façon insuffisante pour expliquer la concentration de

Dans un ouvrage paru en 1667, l'anatomiste danois Nicolas Sténon décrit les dents du chien de mer, qu'il compare à des fossiles trouvés en Toscane. Il suggère ainsi que les fossiles sont d'anciens animaux pétrifiés.

© BIU SANTE PARIS

certains gisements. Quant à la théorie de dépôts par ordre de densité décroissante, Ray émet, là aussi, quelques doutes. Doutes que partage le successeur de Plot au musée d'Oxford, le Gallois Edward Lhwyd.

La thèse du Déluge. Lhwyd, dans une lettre adressée à Ray en 1698, avance une autre explication. Pour lui, les vapeurs qui s'élèvent de la mer, imprégnées de la semence d'animaux à coquilles et du frai de nombreux poissons pénétreraient la terre, sous forme de pluie ou de brouillard. Ensuite, selon la qualité de la semence et la conformité de la matrice, se formeraient tantôt des animaux entiers, tantôt seulement leurs contours, des coquilles, des dents, des vertèbres ou autres petits os. Si vraiment le Déluge était à l'origine du phénomène, pourquoi n'a-t-on pas retrouvé de restes de quadrupèdes et d'oiseaux, voire d'hommes ? Objection à laquelle le Zurichois Johann Scheuchzer, grand admirateur de Woodward, va répondre : il exhume en 1726, dans les schistes des carrières d'Öhningen, dans le sud de l'Allemagne, ce qu'il croit être un homme fossile (en réalité, le squelette en mauvais état d'une salamandre géante). Et la découverte ultérieure de deux vertèbres d'ichtyosaure, attribuées elles aussi à l'« homme témoin du Déluge », conforte dans leurs positions les partisans de l'inondation universelle.

Devant cet afflux d'hypothèses, Buffon est déterminé à faire la part des choses. Le naturaliste français a étudié dans le texte les écrits de ses confrères britanniques, notamment ceux de Ray. Comme lui, Buffon ne croit ni aux semences pétrifiantes, hypothèse par trop invraisemblable, ni aux thèses de Woodward. Pour lui, la Terre s'est trouvée autrefois sous les eaux de la mer, qui >>>

Histoire de science

Des coquillages qui sèment la discorde

››› se sont élevées plus haut que les montagnes, comme l'atteste la découverte de coquilles fossiles au sommet du mont Cenis. Et, de toute évidence, ces eaux ont séjourné quelque temps sur la Terre : on trouve, en plusieurs endroits, des bancs de coquilles si étendus et si fournis qu'il est impossible que tant d'animaux aient tous été vivants en même temps ! Le physicien Réaumur n'a-t-il pas recensé plus d'un milliard de mètres cubes de coquilles enfouis sur le site des faluns de Touraine, à plus de 150 kilomètres de la mer ? La thèse du Déluge, qui implique que tous les coquillages ont été arrachés du fond des mers et transportés d'un seul coup dans le peu de temps qu'a duré celui-ci, ne tient pas. En outre, Buffon a observé que les différentes matières qui composent la Terre se sont déposées en couches régulières sans égard à leur densité. Seule une cause aussi puissante et constante que l'agitation de la mer, sous l'effet du flux et du reflux, peut expliquer le dépôt de matière pesante sur de la matière légère.

L'hypothèse des pèlerins. Le philosophe Voltaire est sourd à de tels arguments. Hostile à l'idée d'un bouleversement général de la planète, il publie anonymement, en 1746, une *Dissertation sur les changements arrivés dans notre globe* et sur les pétrifications supposées en être les témoignages. Dans cet écrit, connu sous le nom de « lettre italienne », car rédigé à Bologne, Voltaire tourne en dérision la thèse du Déluge de Woodward. Il aurait fallu « *que l'eau ait dissous, en cent cinquante jours, toutes les pierres et tous les minéraux de l'univers, pour y loger des huîtres et des pétoncles* ». Woodward aurait pu « *à la vérité s'apercevoir que le marbre, le caillou, etc., ne se dissolvent point dans l'eau...* » !

Voltaire soutient l'idée que les fossiles poussent comme des plantes

Voltaire ne croit pas davantage que la Terre ait pu être le fond d'une mer peuplée d'animaux à coquilles. La ressemblance entre un fossile et un coquillage marin ne doit pas permettre de conclure que le premier est la pétrification du second. D'ailleurs, Voltaire se refuse purement et simplement à croire à l'existence d'amas de fossiles marins. S'étant fait expédier des caisses de terre de Touraine réputée riche en débris de cette sorte, il n'y a vu qu'un mélange d'argile et de calcaire sans intérêt. Quant à l'existence, dans des provinces d'Italie ou de France, de petits coquillages prétendus originaires de la mer de Syrie, ne pourrait-on se souvenir que la foule innombrable des pèlerins et des croisés, en route vers la Terre sainte, en a rapporté beaucoup, dont certains auraient fort bien pu être perdus en chemin ?

Buffon ignore, ou feint d'ignorer, que la lettre est de Voltaire, avec lequel il a jusque-là entretenu des relations cordiales. Mais l'allusion aux pèlerins de Syrie dépasse les bornes. Et, en 1749, dans son *Histoire naturelle,* il réplique : « *Pourquoi l'auteur de la lettre n'a-t-il pas ajouté que ce sont des singes qui ont transporté les coquilles au sommet des hautes montagnes et dans tous les lieux où les hommes ne peuvent habiter ?* »

Quelques démêlés avec des amis de Buffon ayant contribué à envenimer la situation, Voltaire, piqué au vif, contre-attaque, en 1767 dans *La Défense de mon oncle,* et en 1768 dans *L'Homme aux quarante écus*. Il réaffirme haut et fort qu'« *une huître près du mont Cenis ne prouve pas que l'océan Indien ait enveloppé toutes les terres de notre hémisphère* ».

De son côté, Buffon proclame à qui veut l'entendre qu'il n'a pas de temps à perdre avec des « sottises ». Voltaire n'est-il pas allé jusqu'à soutenir l'ingénieur Félix de La Sauvagère qui, ayant observé la formation d'une vase glutineuse et poisseuse dans la pièce d'eau de son parc, a affirmé avoir vu des fossiles germer et pousser comme des plantes ? D'ailleurs, les propos de Voltaire font de moins en moins école. Même son ami suisse, le pasteur Élie Bertrand, auteur d'un mémoire sur les fossiles et jusque-là rétif aux thèses de Buffon, vient de se convertir aux idées nouvelles.

Quelques années passent. Les rancunes finissent par s'émousser. Bien que refusant de se laisser « bercer par des charlataneries », Voltaire ne tient pas à rater le coche, et Buffon, de son côté, est pleinement conscient du prestige dont jouit l'écrivain. La réconciliation a lieu en 1774 : Buffon publie une note dans laquelle il regrette le ton employé dans sa critique de la lettre italienne. Voltaire répond par une lettre à « Archimède II ». Buffon renchérit en s'adressant à « Voltaire I^er^ », le seul, l'unique, l'incomparable, lequel réaffirme ne jamais avoir voulu se brouiller avec Buffon pour une simple « histoire de coquilles ». Quant à la théorie du Déluge, elle perdurera quelque temps, avant de sombrer dans l'oubli. ■

Pour en savoir plus

› Buffon, *Œuvres,* 1783, réédition La Pléiade, Gallimard.

PRIX UNIQUE

39€

l'abonnement

16 GRANDS TITRES DE LA PRESSE

UN PRIX UNIQUE ET IMBATTABLE !

Jusqu'à -77% de remise

1 abonnement → 39 € 2 abonnements → ~~78 €~~ 69 € 3 abonnements → ~~117 €~~ 99 €

BULLETIN D'ABONNEMENT ÉTUDIANT

À renvoyer complété et accompagné de votre règlement, sous enveloppe non affranchie à : PAG15
Rue des Etudiants - Libre réponse 80402 - 21809 Quetigny Cedex

Je suis étudiant(e) ☐ Filière _____ Année d'étude _____

COCHEZ LE OU LES ABONNEMENTS QUE VOUS CHOISISSEZ (1 OU 2 OU 3)

- ☐ Alternatives Economiques | mensuel | 11 nos + l'économie en 30 questions (oct. 2014) + accès illimité à Alternatives Economiques Education
- ☐ Alternatives Internationales | trimestriel | 6 nos + 2 hors-séries + accès aux archives en ligne
- ☐ Bloomberg Businessweek | hebdomadaire | 20 nos
- ☐ Cercle Psy | trimestriel | 8 nos
- ☐ Courrier international | hebdomadaire | 32 nos
- ☐ d'architectures | mensuel | 5 nos
- ☐ L'Eco | hebdomadaire | 39 nos
- ☐ L'Histoire | mensuel | 8 nos
- ☐ Le Magazine Littéraire | mensuel | 9 nos
- ☐ Le Monde diplomatique | mensuel | 9 nos
- ☐ Philosophie magazine | mensuel | 10 nos
- ☐ Population & Avenir | bimestriel | 7 nos
- ☐ La Recherche | mensuel | 8 nos
- ☐ Sciences Humaines | mensuel | 11 nos
- ☐ Time | hebdomadaire | 37 nos + 2 hors-séries
- ☐ Vocable | bimensuel | 23 nos + 1 hors-série

☐ Anglais ☐ Allemand ☐ Espagnol (cochez l'édition choisie)

TOTAL DE MA COMMANDE (COCHEZ UN DE CES 3 CHOIX) :

☐ 1 abonnement → 39 € ☐ 2 abonnements → 69 € ☐ 3 abonnements → 99 €

Nom _____ Prénom _____

Adresse (France métropolitaine seulement) _____

_____

Code Postal | | | | | | Ville _____

E-mail _____

Je règle la somme de ☐ 39 € ☐ 69 € ☐ 99 € par :

☐ Chèque à l'ordre de Rue des Etudiants ☐ Carte bancaire

N° | | | | | | | | | | | | | | | | |

Date d'expiration | | | | |

Cryptogramme (Les 3 derniers chiffres au dos de votre carte.) | | |

Date et signature obligatoires :

Les informations susvisées que vous nous communiquez sont nécessaires au traitement de votre abonnement. Conformément à la Loi Informatique et Libertés du 6 janvier 1978 modifiée par la loi du 6 août 2004, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification des données vous concernant en adressant un courrier à Rue des Etudiants. Ces données pourront être cédées à des organismes extérieurs, sauf opposition écrite de votre part à l'adresse susmentionnée.

www.magazine-litteraire.com

En vente actuellement

le livre du mois

Faut-il donner un prix à la nature ?

Jean Gadrey et Aurore Lalucq

Selon la théorie économique dominante, celle des derniers rapports commandés par les Nations unies, les dégradations de l'environnement sont dues à des défaillances de marché. Autrement dit, les « biens et services » de la nature, n'ayant ni propriétaires ni prix, constituent des « externalités » et sont soumis irrémédiablement au gaspillage. Pour les économistes, il convient donc de les internaliser, c'est-à-dire de définir des droits de propriété, de permettre à des marchés de révéler leur prix grâce au jeu de l'offre et de la demande, et d'en faire ainsi des marchandises. D'où ce slogan qui soutient leur démarche : « Internalisez les externalités ! »

La notion de « services écosystémiques » pour désigner les bénéfices tirés du fonctionnement des écosystèmes, vient en renfort de cette doxa. La biodiversité est dans ce cas représentée comme un flux de services marchands utiles pour le bien-être de l'humanité. Dernière pierre de l'édifice, des paiements pour services environnementaux rémunèrent par contrat ceux qui participent à la bonne santé des écosystèmes, en s'abstenant de défricher ou en restaurant des espaces dégradés, par exemple. Les outils économiques, parce qu'ils fixent des prix censés faire changer les comportements, sont présentés alors comme plus efficaces et moins coûteux pour protéger l'environnement que les actions réglementaires de l'État ou les initiatives citoyennes. Ce système n'est bien sûr pas exempt d'idéologie.

Les Petits Matins, 2015, 128 p., 10 €.

Valeur des chauves-souris. Jean Gadrey et Aurore Lalucq, parce qu'ils se démarquent de cette vision partagée par la majorité de leurs pairs, sont ce que l'on appelle des « économistes hétérodoxes ». Dans leur ouvrage, ils font une analyse critique de cette idée de monétarisation de la nature. Ils dressent tout d'abord les grandes lignes de l'économie de l'environnement (pourquoi, comment en est-on arrivé à donner un prix à la nature ?) et les diverses méthodes d'évaluation monétaire (qui ne conduisent pas toutes à la marchandisation ou à la financiarisation de la nature). Pour répondre à la question de l'efficacité de cette monétarisation, ils présentent ensuite huit études de cas qui vont de la valeur des chauves-souris à la taxe carbone. Et qui illustrent combien l'exercice est périlleux. L'évaluation économique nécessite en effet de multiples hypothèses hasardeuses tant dans le domaine biologique que social.

Pour permettre d'attribuer des valeurs marchandes, les représentations de la biodiversité se simplifient à l'extrême. Ainsi, la nature est réduite à quelques éléments utiles pour l'homme. Par exemple, une forêt tropicale se limite à sa capacité de stocker du carbone ou une zone humide à sa fonction d'épuration. Parallèlement, pour appliquer les outils économiques, il faut définir un encadrement institutionnel et des droits à faire valoir, ce qui ne va pas sans mal : qui est propriétaire de « l'émission évitée de la tonne de carbone » ? Qui est fournisseur du service environnemental « protection de la qualité de l'eau » ? Sur quels critères attribuer quotas de droits à polluer ou crédits monnayables de comportement vertueux ? Quels sont les droits des générations futures ?

Les auteurs démontrent les limites du calcul monétaire, lequel est parfois utile pour chiffrer le coût d'une pollution par exemple, mais ils ne s'attardent hélas pas assez sur le processus de marchandisation de la nature que certains dénoncent. On aura en effet bien du mal à trouver dans les cas étudiés un marché au sens de la théorie économique. Une évaluation monétaire n'est pas un prix. Un paiement pour service environnemental, souvent une simple subvention, n'indique pas le prix d'une fonction biologique. La référence aux services environnementaux paraît essentiellement stratégique, une sorte de produit d'appel pour capter des ressources financières ou justifier des décisions déjà arrêtées. Les choix qui s'imposent sont bien davantage politiques qu'économiques.

Finalement, une seule chose compte : continuer à raffiner des méthodes d'évaluation économique pour maintenir la fiction que les relations vertueuses entre les hommes et la nature passeraient par des marchés. Est-ce bien raisonnable ?

PAR Catherine Aubertin, économiste de l'environnement, directrice de recherche de l'Institut de recherche pour le développement.

Les livres

lu d'ailleurs

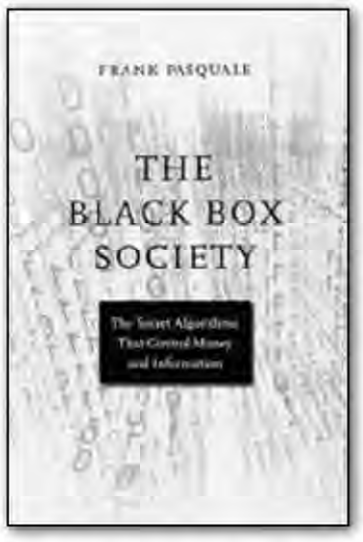
The Black Box Society

Frank Pasquale

Alors que les grandes entreprises déploient des trésors d'imagination pour étendre la surveillance de leurs salariés et de leurs clients, leurs dirigeants se retranchent derrière le secret commercial et industriel quand on leur parle de transparence. *« Surveiller les autres tout en se cachant est l'une des plus importantes formes de pouvoir »*, affirme Frank Pasquale, professeur de droit à l'université du Maryland, aux États-Unis.

Son livre *The Black Box Society* propose une analyse documentée et critique de l'organisation sociale du secret dans le monde de l'Internet, lequel est régi par des algorithmes dont nul ne connaît le fonctionnement. Ces algorithmes permettent à des entreprises de faire commerce de masses de données en provenance du Web, d'établir la réputation d'individus ou d'entreprises autour de calculs de toutes sortes (risques clients, scores médicaux, etc.) et de prendre des décisions en fonction (accorder un crédit ou pas et à quel taux ? Assurer ou pas et à quelles conditions ?). Ces algorithmes permettent à Google, devenu « index universel », de détourner le trafic web vers ses propres services. Ces algorithmes, enfin, assoient des pouvoirs financiers parfois contestables, mais de plus en plus difficiles à contrôler.

En quoi est-il problématique de déléguer notre vie numérique de tous les jours à des instruments de calculs informatiques sophistiqués ? *« Bien que les géants de l'Internet prétendent que leurs algorithmes sont des outils scientifiques et neutres,* écrit Frank Pasquale, *il reste très difficile de le vérifier. »* Des dysfonctionnements majeurs prouvent même le contraire. L'auteur raconte par exemple l'histoire du couple Sheldon qui n'a pu souscrire à une couverture maladie au prétexte que Madame Sheldon avait consommé des antidépresseurs dans le passé. Comment leurs assureurs l'ont-ils découvert ? En croisant leurs fichiers avec les données, non anonymes, des pharmacies. Quant à Latanya Sweeney, professeur à Harvard, elle a vu s'afficher des publicités de services judiciaires juste après une recherche sur son nom dans Google. Il faut dire que son prénom est répandu chez les Afro-Américains. Ce qui révèle les préjugés raciaux des algorithmes.



Harvard University Press, 2015, 311 p., 35 $

Audit des algorithmes. Parallèlement, les industriels du Web – qui tirent profit des principes de gratuité et de transparence appliqués à Internet par des milliards d'internautes – ont pu protéger leurs activités et leurs outils avec l'extension du domaine de la propriété intellectuelle et du secret commercial. Pour Frank Pasquale, l'heure est venue de développer des mécanismes légaux et politiques de transparence pour les entreprises de la Silicon Valley et de Wall Street. Leur surveillance aurait une double vertu : éviter les abus (erreurs de données, inférences arbitraires, etc.), et rendre les entreprises et les outils meilleurs. L'auteur se plaît ainsi à proposer un audit des algorithmes et de leurs usages ou l'élévation des critères de notation des entreprises de l'Internet et de la finance. Cela permettrait d'imaginer *« un futur dans lequel le pouvoir de l'autorité algorithmique consiste à promouvoir l'équité, la liberté et la rationalité. »*

■ **Julie Bouchard, maîtresse de conférences, université Paris-XIII/Labisc**

à signaler

Climat

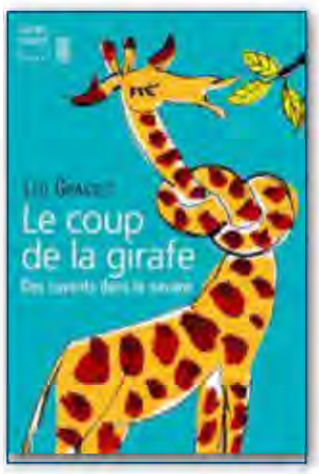
L'arbre et la forêt à l'épreuve d'un climat qui change

Laurent Michel (dir.)

La Documentation française, 2015, 184 p., 15 €.

Nous voilà en août 2050, au cœur de la forêt domaniale de Tronçais, dans l'Allier. À quoi ressemble-t-elle ? Comment s'est-elle adaptée au changement climatique ? Ce récit d'anticipation, auquel ont contribué près de 70 spécialistes des arbres et de la forêt, pose les conséquences déjà observables du réchauffement climatique et souligne les défis à relever, à travers la gestion forestière ou l'agroforesterie.

Histoire naturelle



Le Coup de la girafe

Léo Grasset

Seuil, 2015, 144 p., 15 €.

Célèbre pour sa chaîne DirtyBiology sur YouTube, Léo Grasset, passionné de biologie évolutive, est parti au Zimbabwe en 2013 pour réaliser un photoreportage scientifique. Lequel s'est transformé en chronique des animaux de la savane et de leurs spécificités. C'est donc avec simplicité et humour qu'il nous explique dans ce livre que les buffles ont un sens inné de la démocratie alors que les éléphants ont tendance à la dictature ou que les hyènes femelles ont un pénis !

Médecine

La Force du système immunitaire

Jacques Thèze

Odile Jacob, 2015, 320 p., 25,90 €.

Pour se défendre face aux virus et aux bactéries, notre organisme mobilise de nombreuses cellules et molécules : macrophages, cellules tueuses, lymphocytes régulateurs, molécules antibactériennes... Jacques Thèze, professeur à l'Institut Pasteur, nous dévoile toute la complexité du système immunitaire. Celui-ci se révèle comme une individualité à part entière, dotée d'un langage, d'une sensibilité, de stratégies préétablies, celles de nos défenses innées, mais aussi de facultés d'apprentissage et de mémoire.

Biologie

La Génétique pour les nuls

Patrice Bourgeois, Tara Rodden Robinson

First Éditions, 2015, 384 p., 22,95 €.

Quelle différence entre ARN et ADN ? Qu'est-ce que le code génétique ? Que révèlent les chromosomes ? Quels sont les avantages et les inconvénients des OGM ? Fidèle à son habitude, la collection « Pour les nuls » propose un (vaste) cours de rattrapage sur la génétique. L'occasion, pour ceux qui étaient passés à côté, de décrypter les enthousiasmes et les réticences de nos sociétés face aux révolutions engendrées par cette science.

Big data

La Vie algorithmique

Éric Sadin

L'Échappée, 2015, 288 p., 17 €.

L'homme du XXIe siècle a une valeur numérique qui ne cesse de croître. Affublés de capteurs, les objets, même les plus anodins, produisent leur lot de données afin de nous mesurer au quotidien. Ce qui permet aux industriels de lancer de nouveaux services fort rémunérateurs. L'auteur analyse le processus et les enjeux économiques, politiques et sociétaux qui en découlent.

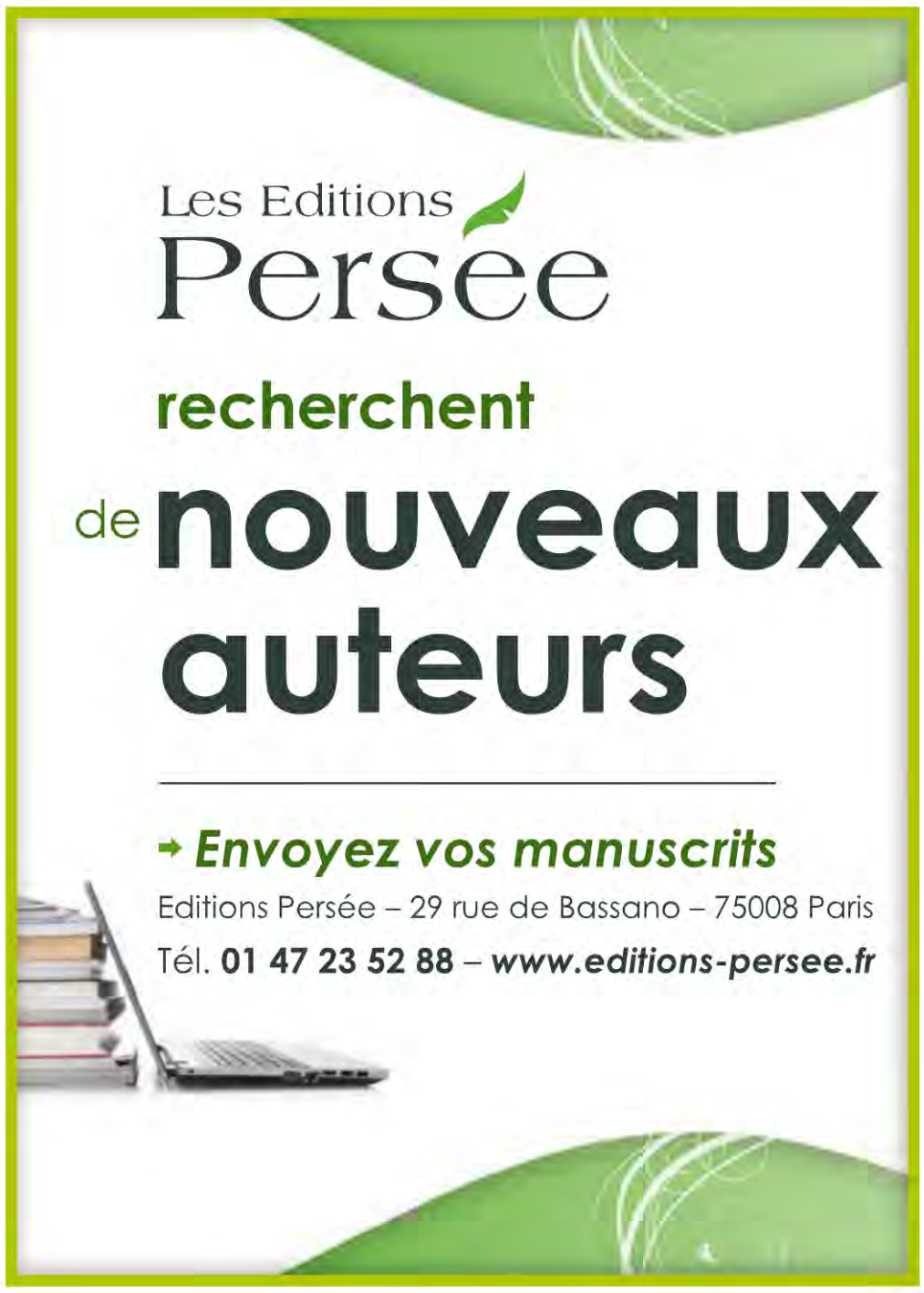
Psychologie

Adultes sensibles et doués

Arielle Adda, Thierry Brunel

Odile Jacob, 2015, 304 p., 23,90 €.

Écrit à quatre mains par la psychologue Arielle Adda et le consultant Thierry Brunel, ce livre donne des clés pour comprendre la personnalité des adultes surdoués et les difficultés qu'ils peuvent rencontrer dans le monde du travail. Hypersensibles, perfectionnistes, dotés d'une grande capacité d'analyse et de synthèse, ils sont souvent fragilisés par ces traits de caractère qui freinent leur épanouissement dans la vie sociale. À travers des exemples, ›››



Les livres

>>> les deux auteurs montrent comment ils peuvent éviter de tomber dans les pièges tendus par leurs dons.

Astrophysique

Cosmicomic

Amedeo Balbi, Rossano Piccioni

Nouveau Monde Éditions, 2015, 150 p., 18 €.

En 1964, Arno Penzias et Robert Wilson, deux jeunes radioastronomes, étudient la Voie lactée et détectent un bruit de fond sur leur antenne. Ils ne le savent pas encore mais ce signal provient du « rayonnement fossile », émis juste après la naissance de l'Univers. Cette bande dessinée retrace l'histoire de cette découverte fortuite et l'enquête scientifique qui s'en est suivie. Avec comme personnages principaux des figures aussi célèbres qu'Edwin Hubble ou Albert Einstein.

Histoire des sciences

Signé Vrain Lucas !

Gérard Coulon

Éditions Errance, 2015, 192 p., 23 €.

Newton a volé à Pascal la découverte des lois de l'attraction des corps massifs ! De 1867 à 1869, l'Académie des sciences discuta de ce fait d'histoire des sciences et de bien d'autres, tout aussi fantaisistes, sur la foi de lettres autographes présentées par le mathématicien Michel Chasles. Ce livre raconte l'histoire du faussaire, Vrain Lucas, et de ses motivations.

Sociologie

Disparaître de soi

David Le Breton

Métailié, Coll. « Traversées », 2015, 208 p., 17 €.

Dépression, conduites à risques chez les adolescents, disparition volontaire… autant d'états que le sociologue David Le Breton rassemble sous un même nom : la Blancheur. Ils ont en commun le rejet du monde par l'individu, le déni de soi. Cet essai, parfois émouvant, décrit différentes façons de fuir. L'auteur s'arrête sur la disparition d'Ettore Majorana, un des scientifiques les plus prometteurs du XXe siècle, et dresse le portrait psychologique de ce dernier.

Anthropologie

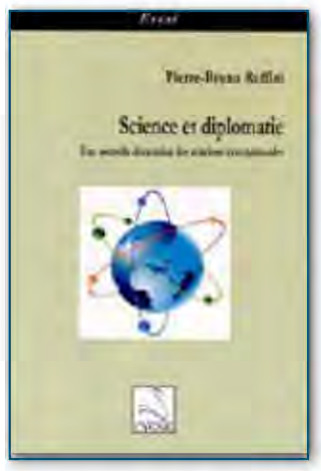
Seuls ensemble

Sherry Turkle

L'Échappée, 2015, 528 p., 22 €.

Sherry Turkle a consacré une partie de sa vie universitaire à penser le virage numérique et robotique. Sa vision pessimiste est nourrie de son travail d'anthropologue. Elle décrit les dérives rencontrées dans ses recherches : une femme qui comble sa solitude grâce à une peluche animée, une autre qui rêve de délaisser son ami pour un robot…

Politique



Science et Diplomatie

Pierre-Bruno Ruffini

Éditions du Cygne, 2015, 236 p., 24 €.

Comment définir la diplomatie scientifique ? Quel rôle la science a-t-elle à jouer dans les relations internationales ? Le savant doit-il faire alliance avec le diplomate ? Voici quelques-unes des questions auxquelles répond Pierre-Bruno Ruffini, ancien conseiller diplomatique français pour la science et la technologie, dans un essai à la fois complet et synthétique sur les relations entre science et diplomatie.

BEAU LIVRE

Des Gorilles et des Hommes [Carnet de voyage] naturaliste au Congo-Brazzaville

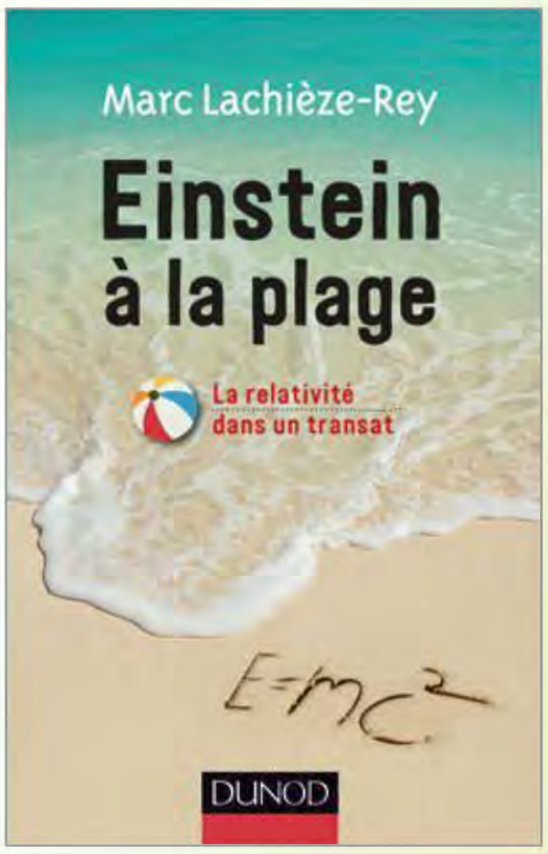
Pendant sept semaines, A. Dan (de son vrai nom Daniel Alexandre) est parti à la rencontre des gorilles en République du Congo, plus communément appelée Congo-Brazzaville, en compagnie d'une équipe de primatologues de l'unité de recherche rennaise du CNRS Ecobio. C'est le récit de sa découverte « d'un autre monde », de ses rencontres à la fois animales et humaines qu'il livre dans cet ouvrage magnifiquement illustré par ses aquarelles et portraits.

Coll. « Les Carnets de la Boîte à Bulles », la Boîte à Bulles, 2015, 144 p. 23 €.

Et aussi :

Ouvrez quelques cadavres
Philippe Charlier, Buchet Chastel, 2014, 229 p., 18 €.

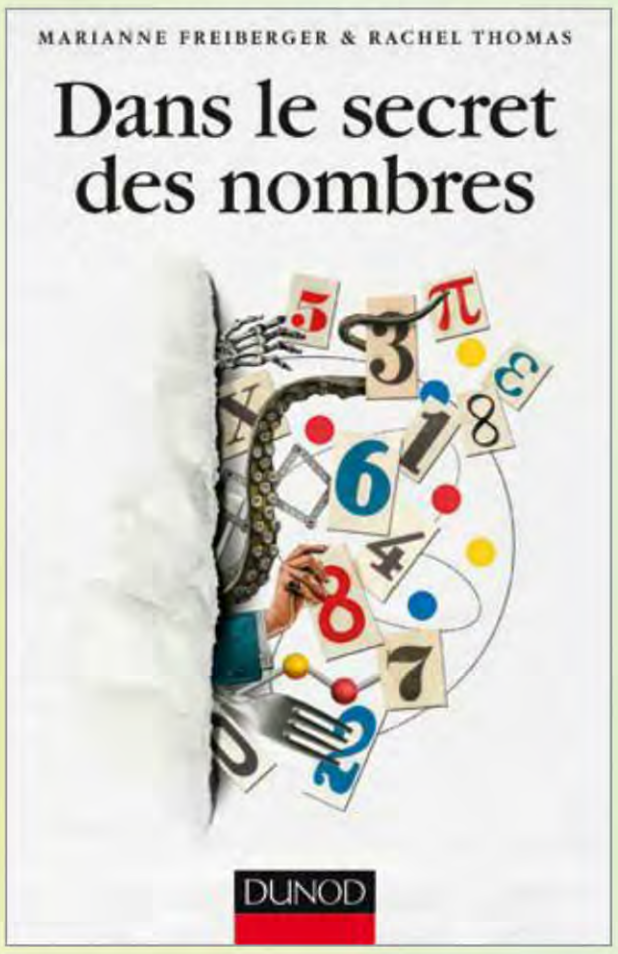
VARIEZ LE PLAISIR DES SCIENCES



M. LACHIEZE-REY

9782100722235 ▪ 160 pages ▪ **14,50 €**

Laissez Marc Lachièze-Rey vous guider sur le chemin menant de la relativité aux modèles de big bang et aux trous noirs.



M. FREIBERGER, R. THOMAS

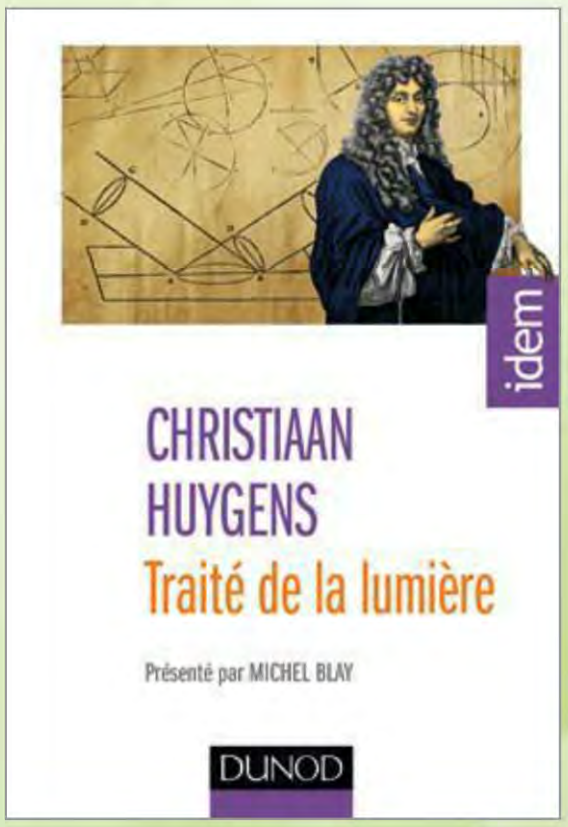
9782100722198 ▪ 320 pages ▪ **18,90 €**

De zéro à l'infini, chaque nombre est le point de départ d'histoires drôles, curieuses ou tragiques.

B. D'ESPAGNAT

9782100724376 ▪ 256 pages ▪ **15 €**

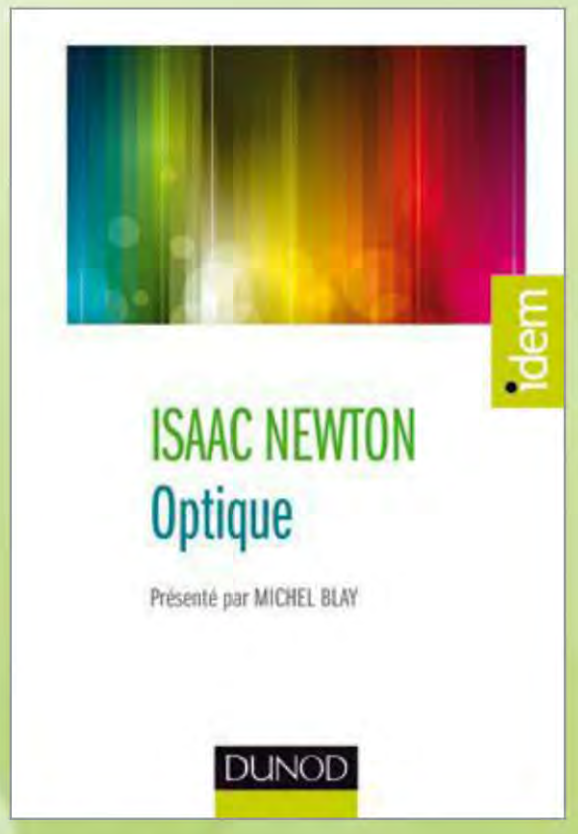
Le physicien Bernard d'Espagnat aborde la question du « réel », défendant l'idée qu'il est indispensable de la traiter en tenant compte des leçons de la physique contemporaine.



C. HUYGENS

9782100716807 ▪ 208 pages ▪ **15 €**

Dans ce célèbre Traité, écrit il y a plus de trois siècles, Christiaan Huygens expose l'une des premières théories ondulatoires de la lumière.



I. NEWTON

9782100716791 ▪ 384 pages ▪ **16 €**

En 1704, Newton donne la première théorie mathématique des phénomènes de la couleur.

Tous nos ouvrages sont disponibles en librairie

C'EST À SAVOIR

Rejoignez-nous sur Facebook

DUNOD
ÉDITEUR DE SAVOIRS

Réalisation : WIP

Du 6 mai au 3 juin

La lumière dévoile l'Univers

Cycle de conférences. Messagère infatigable, la lumière nous révèle l'origine et la nature de l'Univers, ou encore la formation des premières étoiles et galaxies. Pendant un mois, chaque mercredi à 19 h, des astrophysiciens racontent comment ils étudient les trous noirs et les étoiles, le fond diffus cosmologique ou l'expansion de l'Univers.

Paris, Palais de la découverte. www.palais-decouverte.fr

Le 9 mai, 19 h

© LAZARUS, P. JEAN & H. BROCH

Illusions, emprises et méprises de notre cerveau

Conférence. Illusions d'optique, rémanence rétinienne, effets de contraste, paréidolie (par exemple l'identification de visages dans les nuages) : ces phénomènes expliqués par le physicien Henri Broch montrent que notre cerveau s'évertue à compléter, comparer et ordonner les informations que nous percevons, au prix de quelques surprises.

Èze-le-col (Alpes-Maritimes), Astrorama. www.astrorama.net/soirees_conferences

Le 12 mai, 20 h 30

Le loup, le chien et l'homme

Conférence. Pour comprendre le chien, il faut comprendre le loup dont il est un descendant direct. L'éthologue Pierre Jouventin, qui a vécu dans l'intimité des loups, explique comment le meilleur ami de l'homme a conservé les comportements de son ancêtre.

Rennes (Ille-et-Vilaine), Espace des sciences. www.espace-sciences.org

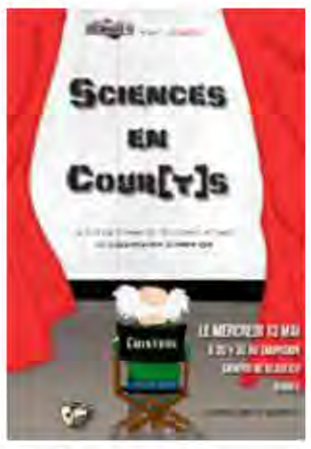
Le 13 mai, 19 h 30

L'érosion des côtes est-elle inéluctable ?

Conférence. La mer est un concentré d'énergie qui se libère lors des tempêtes. Comme elle, la côte est un espace mouvant. Or les interventions humaines figent le littoral. La géographe Yvonne Battiau-Queney analyse les risques qui en découlent et les solutions possibles.

Paris, Institut océanographique. http://tinyurl.com/erosion-des-cotes

Le 13 mai, 20 h 30



Sciences en cour[t]s

Festival. Expliquer ses recherches sur grand écran et en moins de cinq minutes : c'est le défi qu'ont relevé les doctorants participant à ce festival. Mathématiciens, biologistes, bio-informaticiens et autres se sont prêtés au jeu de la vulgarisation. Leurs courts-métrages sont ici présentés au public.

Rennes (Ille-et-Vilaine), le Diapason. www.sciences-en-courts.fr

Le 17 mai, 11 h

Casser en s'amusant

Conférence expérimentale. Comment les choses se cassent-elles ? Pourquoi le verre et la craie se brisent tout net alors qu'un métal se déforme ? À travers des expériences simples et ludiques auxquelles le public est associé, trois chercheurs-casseurs de l'ESPCI ParisTech et de l'université Pierre-et-Marie-Curie répondent à ces questions.

Paris, Théâtre de la Reine blanche. http://tinyurl.com/casser-en-s-amusant

Le 18 mai, 19 h

Naître fille ou garçon : trois siècles d'enquêtes

Conférence. Comptabiliser les filles et les garçons à la naissance est une préoccupation de savants depuis trois siècles. Que montrent ces dénombrements et comment les analyser ? Des questions traitées par le prisme de l'arithmétique politique, des « sciences morales » ou de l'histoire naturelle. Marie Jaisson, sociologue, et Éric Brian, historien des sciences, retracent ce parcours.

Aubervilliers (Seine-Saint-Denis), conservatoire Aubervilliers-La Courneuve. www.campus-condorcet.fr

Du 18 au 20 mai

Pint of Science

Festival. Rencontrer et échanger avec des scientifiques, non pas au labo mais au bistrot : voilà ce que propose Pint of Science. Les impacts du changement climatique, les épidémies actuelles, les hasards de la génétique, l'énergie noire ou encore l'humain augmenté comptent parmi les nombreux sujets abordés.

Dans de nombreuses villes de France. http://pintofscience.fr

Le 20 mai 2015, 15 h 30

La crépidule est-elle toujours aussi invasive ?

Conférence. Gastéropode marin originaire de la côte Est des États-Unis, la crépidule a envahi depuis quarante ans plusieurs baies de la façade Manche-Atlantique. Pourtant, explique le biologiste Antoine Carlier, certaines populations de crépidules commencent à décliner, notamment en rade de Brest. De nombreux travaux scientifiques sont réalisés sur ces changements écologiques.

Plouzané (Finistère), Centre Ifremer Bretagne. http://tinyurl.com/gasteropodes

Le 21 mai, 19 h

Épilepsie : des traitements pour demain

Conférence. Cinquante cas pour 100 000 habitants environ, telle est l'incidence de l'épilepsie dans les pays développés. Aujourd'hui, 60 à 70 % des patients répondent favorablement aux traitements médicamenteux. Gilles Huberfeld, neurologue, parle des nouvelles thérapies à l'étude.

Paris, Cité des sciences et de l'industrie. www.cite-sciences.fr/fr/au-programme

Le 26 mai, 19 h 30

Her

Projection débat. Inconsolable à la suite d'une rupture, un homme tombe amoureux de Samantha, un programme informatique intelligent. Emmanuel Grimaud, anthropologue, Jérôme Pesenti,

La Nuit européenne des musées

Comme chaque année, plus de 700 musées en France sont ouverts pendant une nuit. C'est l'occasion de visiter les établissements scientifiques participant à l'opération. Le Muséum d'histoire naturelle de Marseille, le Jardin des sciences de Dijon, le Musée d'histoire naturelle et d'ethnographie de Colmar, et bien d'autres ouvrent leurs portes pour cet événement. Et parce que 2015 est l'Année de la lumière, ce sujet sera au cœur de plusieurs soirées, comme au Conservatoire national des arts et métiers à Paris, qui montre des expériences mettant en jeu la lumière, ou au Jardin des sciences de Strasbourg, qui propose des expositions sur ce thème.

Le 16 mai, dans toute la France www.culturecommunication.gouv.fr/nuitdesmusees

Anniversaire

> EN 1975 était créé le Conservatoire du littoral, établissement public destiné à aménager et à protéger des espaces naturels du littoral français. À l'occasion du 40e anniversaire de cette institution, la fête de la Nature, du 20 au 24 mai, adopte le thème «Au bord de l'eau». Plus de 5 000 manifestations gratuites sont programmées sur tout le territoire français, en métropole et en outre-mer. Chacun est invité à découvrir la faune et la flore des littoraux, des lacs ou des rivières. Par exemple, vous pourrez observer à Viry-Châtillon les invertébrés qui se cachent au fond des mares, comprendre leur développement et leur rôle dans l'écosystème, découvrir la biodiversité de la réserve naturelle de Saint-Quentin-en-Yvelines, ou encore prendre part à des programmes de science participative, comme l'inventaire des insectes pollinisateurs.

> www.fetedelanature.com

vice-président d'IBM Watson et Michèle Sebag, informaticienne, proposent de débattre de cette vision du futur où la frontière entre l'homme et la machine n'est plus évidente.

Paris, cinéma Grand Action. www.ihp.fr/fr/cine-club-2015

Le 28 mai, 18 h

J'ai fait mon travail de médecin

CONFÉRENCE. En novembre 2009, l'Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé retire du marché le Mediator, médicament prescrit depuis 1976 et responsable de plusieurs centaines de décès. Irène Frachon, pneumologue au CHU de Brest, revient sur cette «affaire Mediator», qu'elle avait déclenchée en signalant des cas de valvulopathies attribuées au médicament.

Marseille (Bouches-du-Rhône), Espace Éthique Méditerranéen. http://tinyurl.com/affaire-mediator

Le 28 mai à 18 h 30

Les grands explorateurs de l'Égypte et du Soudan

CONFÉRENCE. Il existe bien des manières d'explorer un pays ou une civilisation, de l'aventure sur le terrain aux recherches documentaires. Élisabeth David, du département des antiquités égyptiennes du musée du Louvre, met en lumière cette diversité d'approches à travers les travaux de quelques grands explorateurs, aventuriers, agents recenseurs ou savants de l'Égypte et du Soudan.

Marseille (Bouches-du-Rhône), Bibliothèque de l'Alcazar. www.provenceegyptologie.org

Le 28 mai à 20 h 30

© L.ROUX

De la fouille à la réplique d'un ancien navire grec

CONFÉRENCE. En 1993, deux épaves grecques du VIe siècle avant notre ère étaient découvertes à Marseille. Leur étude a révélé leur architecture précise. Pierre Poveda, archéologue naval, raconte le projet d'archéologie expérimentale lancé en 2003 qui a permis la reconstitution de l'un de ces navires.

Carnac (Morbihan), Musée de préhistoire. www.museedecarnac.com/conferences.php

Du 28 au 31 mai

Salon Culture et Jeux mathématiques

SALON. Les mathématiques, pièce maîtresse de la philosophie pendant des millénaires, rejoignent le thème de la lumière, des ondes et des astres pour cette 16e édition du Salon. Des animations manipulations, jeux et énigmes autour des phénomènes lumineux sont au programme, ainsi qu'une conférence de l'astrophysicien Jean-Pierre Luminet.

Paris, place Saint-Sulpice. www.cijm.org/salon

Jusqu'au 28 juin

La course au pôle Sud

EXPOSITION. Entre 1911 et 1912, deux explorateurs entraînent leur équipe respective dans une course éprouvante de près de 3 000 kilomètres pour atteindre le pôle Sud. L'exposition retrace cette expédition de l'extrême, qui a ouvert la voie aux recherches scientifiques en Antarctique.

Lyon (Rhône), musée des Confluences. http://tinyurl.com/course-pole-sud

Le mois prochain dans

LA Recherche

Dossier

Recherche française : la relève

Ils ont moins de 40 ans et ont déjà à leur actif des réalisations majeures en mathématiques, en physique, en biologie… Portraits des chercheurs qui dessinent la science de demain.

Savoir

La naissance de l'altruisme

Dès ses premiers mois, l'enfant éprouve déjà de l'empathie pour ses proches. À partir de quand cette capacité se développe-t-elle ? Comment teste-t-on le sens moral des nourrissons ? Les animaux en sont-ils dotés ?

N° 500 • EN VENTE LE 21 mai 2015

Curiosités

Psychologie de cafard

Le courage n'est pas le propre de l'homme. Des biologistes de l'université libre de Bruxelles ont conclu que nous partagions cette qualité avec les cafards. Pendant une semaine, ils ont étudié 9 groupes de 16 cafards mâles de l'espèce *Periplaneta americana*. Dans leur expérience, chaque insecte était doté d'une puce radio pour un suivi individuel. Les cafards étaient ensuite lâchés dans une arène en plastique exposée à une source de lumière intense, difficile à supporter pour ces arthropodes. Deux abris avaient donc été mis en place pour qu'ils puissent fuir la lumière. En analysant les trajectoires individuelles des cafards, les chercheurs se sont aperçus que certains individus, les moins braves, se dirigeaient illico vers le refuge le plus proche. Les autres, plus aventureux, exploraient les alentours avant de s'abriter. Après avoir répété l'expérience trois fois pour chaque groupe, les individus les plus courageux restaient les mêmes. Preuve, selon ces biologistes, que ces insectes ont une personnalité.

http://tinyurl.com/cafard-courage

Fondus de sucettes

Annie aime les sucettes. Mais en combien de coups de langue les finit-elle ? Pour répondre à cette question, des physiciens américains ont étudié la façon dont cette sucrerie se dissout dans l'eau au cours du temps. En faisant varier la vitesse d'écoulement de l'eau, mais aussi la forme et l'épaisseur des sucettes, ils ont remarqué qu'elles évoluent toutes vers la même forme avant de disparaître : une silhouette bombée à l'avant et aplatie à l'arrière. Ils ont ensuite estimé à mille le nombre de coups de langue nécessaires pour dissoudre un centimètre de sucette. Qu'elle ait le goût d'anis ou non.

http://tinyurl.com/physique-sucette

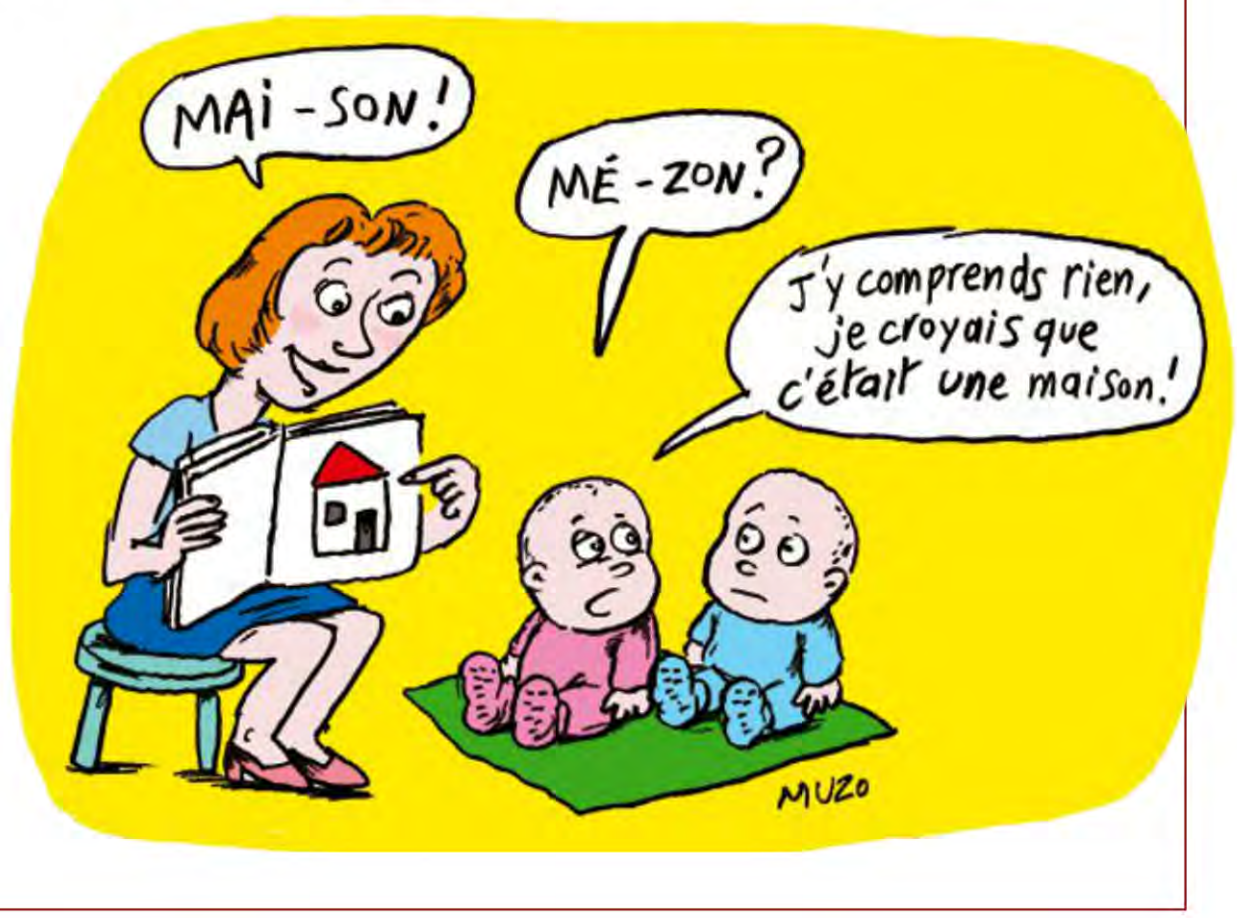
Obésité virtuelle, impact réel

Et si l'habit faisait finalement le moine ? C'est ce qu'indique une expérience menée auprès de 96 étudiantes de l'université de Californie, aux États-Unis. Bardées de capteurs, ces dernières devaient jouer à un jeu de tennis virtuel sur une console détectant leurs mouvements. Chaque étudiante se voyait attribuer au hasard un avatar de joueuse de tennis qui reproduisait ses gestes. Particularité de cette sportive virtuelle ? Elle pouvait être obèse ou svelte. Sa morphologie n'avait aucun impact sur la vitesse et la fluidité de ses mouvements. Pourtant, les participantes ont eu tendance à dépenser moins d'énergie avec un avatar obèse. Et cela indépendamment de leur poids réel. http://tinyurl.com/jeux-video-sport

Qui c'est le bêêêbêêê à sa mâââmaaannn ?

Difficile de ne pas exagérer la prononciation des mots lorsqu'on s'adresse à un bambin. Pourtant, ce « langage de bébé » ne rendrait pas le discours des adultes plus intelligible. Au contraire ! Des psycholinguistes ont ainsi enregistré la voix de 22 mères japonaises qui s'adressaient successivement à leur bébé âgé de 18 à 24 mois et à un adulte. À l'aide d'un programme informatique, ils ont d'abord identifié automatiquement les 118 syllabes les plus fréquentes dans le discours des mères avant de comparer le contraste sonore de ces syllabes. Résultat, ce contraste est plus faible quand un adulte s'adresse à un bébé, avec un impact néfaste sur la clarté de la prononciation. Nul besoin donc de se décrocher la mâchoire pour se faire comprendre.

http://tinyurl.com/parler-aux-bebes



© ISAAC PLANAS-SITJÀ/ UNIVERSITÉ LIBRE DE BRUXELLES - UNIVERSITY OF CALIFORNIA, DAVIS - ILLUSTRATION MUZO

OPEN INNOVATION

by

COSMETIC VALLEY

FRANCE

Submit your projects and expertises

Meet major companies at

COSMETIC360®

INNOVATIONS & SOLUTIONS > PARIS

© www.plainevue.fr - 2015 - Fotolia (Konstantin Yuganov) - Imprimé en France.

The international Perfumery and Cosmetic innovations exhibition

15th and 16th october 2015 - CARROUSEL DU LOUVRE - PARIS

Information and Registration on www.cosmetic-360.com
contact@cosmetic-360.com - Tel: +33237211211

Voter, c'est décider de l'avenir de ma banque.

À la CASDEN, chaque Sociétaire est invité à s'exprimer lors des Assemblées Générales, selon le principe coopératif 1 personne = 1 voix !

Je vote en ligne
sur ***https://jevote.casden.fr*** *(1)*

(mes identifiants sont sur le matériel de vote adressé par la CASDEN Banque Populaire)

ou

Je vote par correspondance
Je retourne mon bulletin de vote ***dans l'enveloppe T*** *(2)*

Une question, bulletin de vote égaré ? *Je contacte le* ***0164801343***
(Appel non surtaxé, coût selon votre opérateur, du lundi au vendredi de 8h30 à 18h30, heures métropole).

(1) Assemblée Générale Ordinaire (AGO) : clôture du vote le 12 mai 2015 ou à défaut de quorum le 26 mai 2015, à 15 heures, heure de Paris. Assemblée Générale Extraordinaire (AGE) : clôture du vote le 28 avril 2015, ou a défaut de quorum le 12 mai 2015 ou à défaut de quorum le 26 mai 2015, à 15 heures, heure de Paris.
(2) AGO : tout bulletin papier reçu après le 10 mai 2015 ou, à défaut de quorum, le 24 mai 2015 ne pourra être pris en compte. AGE : tout bulletin papier reçu après le 26 avril 2015 ou, à défaut de quorum, le 10 mai 2015 ou, à défaut de quorum, le 24 mai 2015 ne pourra être pris en compte.

casden
BANQUE POPULAIRE

CASDEN, la banque coopérative de l'éducation, de la recherche et de la culture

CASDEN Banque Populaire à capital variable. Siège social : 91 Cours des Roches 77186 Noisiel. Siret n° 784 275 778 00842 - RCS Meaux.
Immatriculation : Killoffer.